Numero 329
Gennaio 1996
Anno XXIX
Volume LVI

I prototipi virtuali del CERN

Con la realtà virtuale oggi è possibile esplorare e verificare i progetti del futuro supercollisore LHC «navigando» al suo interno

di Silvano de Gennaro

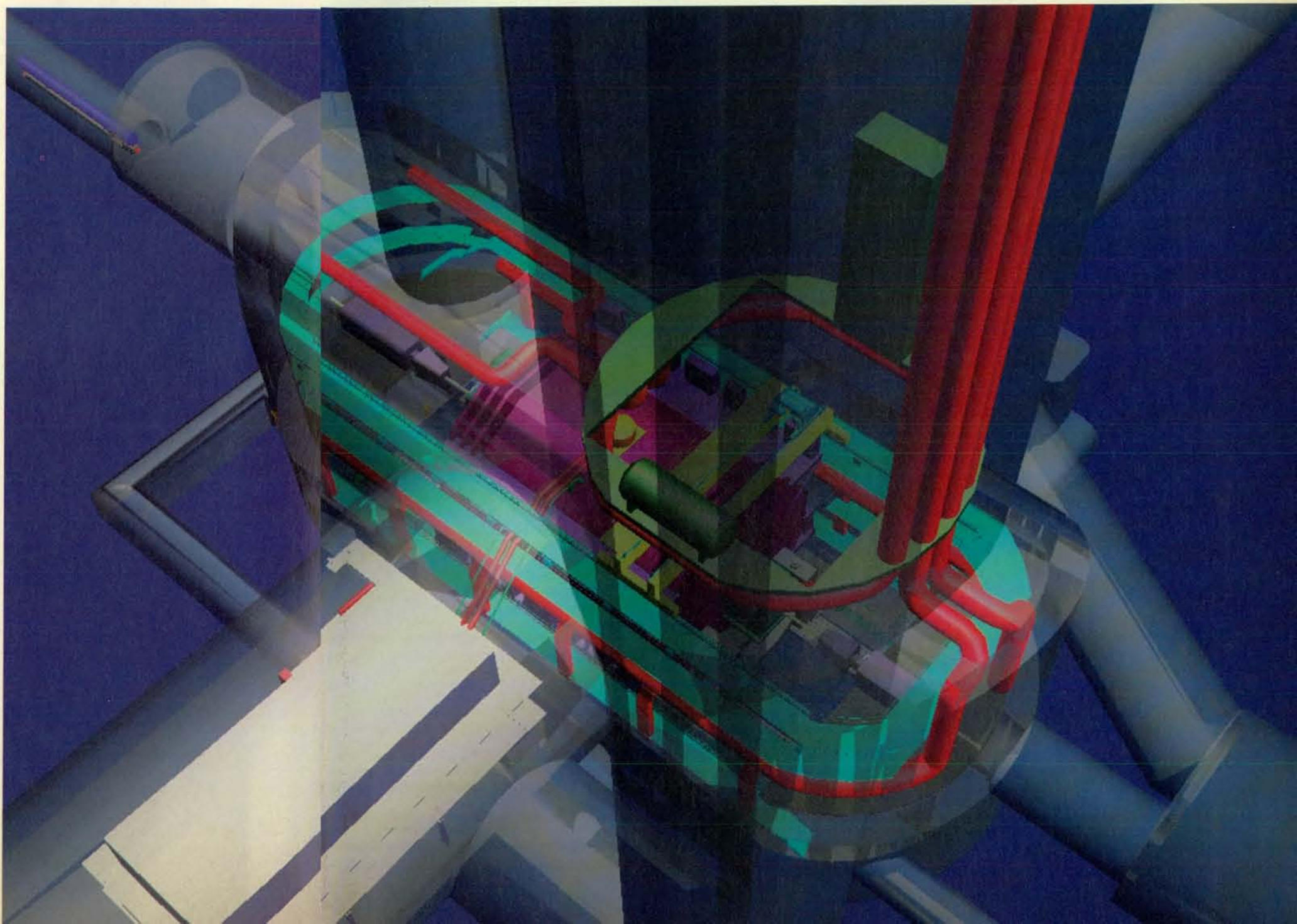
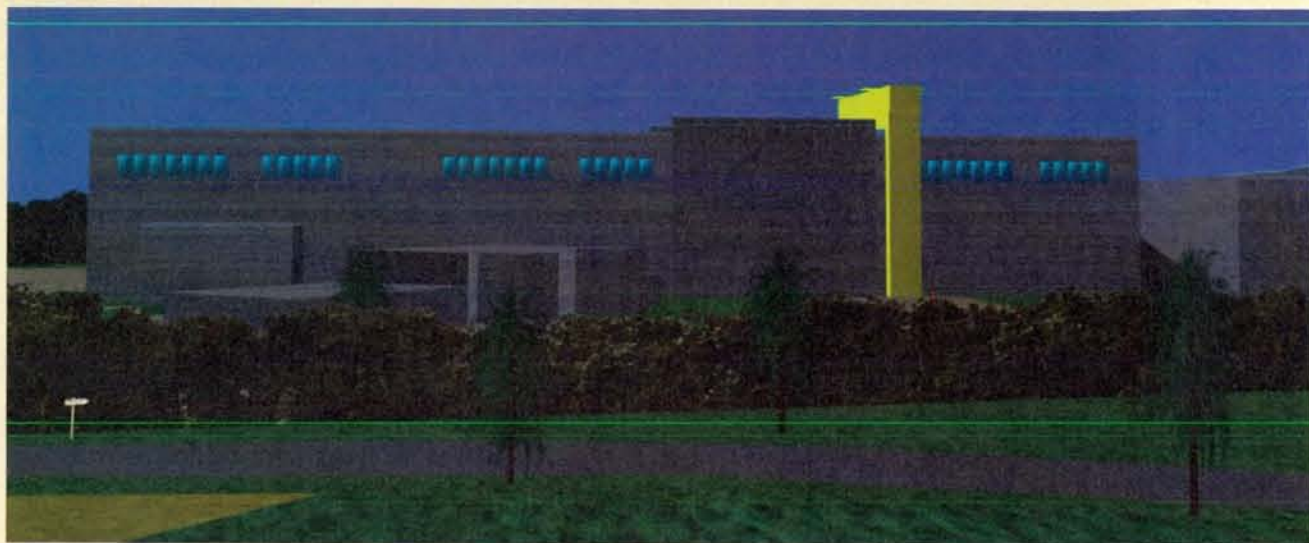
Uscendo dal tunnel ci lasciamo alle spalle l'acceleratore di particelle per entrare nella sala sperimentale di ATLAS, una cattedrale di cemento sotterranea; davanti a noi il calorimetro a muoni. Alzando la testa scopriamo di essere al fondo di un enorme pozzo. Premendo un bottone voliamo al di sopra del magnete toroidale, un'imponente struttura ottagonale alta più di venti metri. Passiamo attraverso innumerevoli strati d'acciaio e di fili di rame tessuti fittamente per arrivare al *beam pipe*, il sottile tubo a vuoto dove fra una decina d'anni fasci di particelle subatomiche saranno accelerati con una energia mai raggiunta prima sulla Terra. Girando una manopola ci togliamo di testa il casco e il sogno si spezza. Siamo fra le quattro mura di un ufficio del CERN che funge da laboratorio per il progetto VENUS, nei cui computer si fabbricano i prototipi virtuali del futuro acceleratore.

Nel febbraio scorso il Consiglio del CERN ha approvato la costruzione del Large Hadron Collider (LHC). Con una energia totale di 14 Tev (teraelettronvolt, 10^{12} elettronvolt), l'LHC sarà il più potente acceleratore del mondo e probabilmente la più complessa e sofisticata macchina elettronica mai costruita dall'uomo. L'acceleratore sarà situato nel tunnel oggi occupato dal LEP (Large Electron Positron Collider), l'attuale acceleratore del CERN, un anello di 27 chilometri di circonferenza scavato a 100 metri di profondità, e opererà a una temperatura di 1,9 Kelvin (–271 gradi Celsius). Più di trecento università e istituti di ricerca di tutto il mondo stanno preparando esperimenti che avranno inizio nel 2004, anno in cui la costruzione dell'LHC sarà probabilmente terminata, e ci permetteranno di riprodurre e studiare le condizioni dell'universo all'età di 10^{-11} secondi dopo il big bang, pressappoco l'istante in cui si formarono tutti gli elementi. Grazie a queste ricerche potremo approfondire la nostra conoscenza della struttura della materia e dell'energia.

Il progetto VENUS (Virtual Environment Navigation in the Underground Sites, ovvero navigazione in ambiente virtuale nei siti sotterranei) ha il compito di simulare l'intero complesso LHC in realtà virtuale, per permettere a progettisti e fisici del CERN una visione dettagliata e naturale delle sue intricate strutture, dieci anni prima della costruzione. Circa un anno dopo la sua creazione, VENUS dispone già dei «prototipi virtuali» dei tre esperimenti proposti (ATLAS, CMS e ALICE).

Come abbiamo appena potuto scoprire nel nostro «volo virtuale», questi esperimenti saranno installati sul fondo di enormi pozzi, larghi una trentina di metri e profondi circa ottanta. Le sale sperimentali ospiteranno i rivelatori di particelle, consistenti di oltre 3000 tonnellate di magneti e fili superconduttori. Un dedalo di corridoi e pozzi ausiliari ospiterà l'infrastruttura criogenica, le parti meccaniche e l'elettronica di lettura ed elaborazione dei dati. Oggi VENUS ci permette già di viaggiare in questi pozzi sperimentali del futuro, e di esaminare i modelli tridimensionali dall'interno. Indossando un elmetto di realtà virtuale, si può navigare nel modello elettronico esaminandone ogni aspetto in scala naturale. Grazie a un sistema magnetico di localizzazione il computer - una stazione Silicon Graphics Onyx RealityEngine2 - riceve 60 volte al secondo informazioni sulla posizione e l'orientazione della testa del navigatore, e manda agli schermi dell'elmetto le immagini degli oggetti virtuali posti nel suo campo visivo. Ogniqualvolta il navigatore muove la testa, l'immagine scorre esattamente come avviene a chi si guardi attorno nel mondo reale.

La sensazione generale di un «volo» in realtà virtuale è molto simile a un'immersione subacquea. Fatta eccezione per i vetri appannati, si ha infatti più o meno la stessa visibilità che procura una maschera da sub. Per aumentare la sensazione di «immersione» nel modello, il computer produce le immagini in stereoscopia. Questa tecnica, più conosciuta come stereovisione, fu usata in alcuni film degli anni sessanta per produrre immagini in rilievo, visibili attraverso occhiali bicolori (normalmente rosso e blu). Oggi, per produrre l'illusione della profondità, si usano tecniche più sofisticate, come la polarizzazione magnetica, gli occhiali a otturatori sincronizzati oppure la doppia immagine binoculare, come nei *view master*. Gli elmetti di realtà virtuale sfruttano quest'ultima tecnica. VENUS dispone anche di altri metodi di visualizzazione stereoscopica, come un grande schermo a proiezione polarizzata, che permette a gruppi di lavoro di assistere contemporaneamente a voli in ambienti virtuali,

Il prototipo virtuale del rivelatore di CMS, uno degli esperimenti proposti per l'LHC, il nuovo collisore del CERN.

Un modello di territorio con le costruzioni di superficie e gli edifici di accesso al tunnel sotterraneo. Oltre alle installazioni sotterranee, VENUS simula anche le aree di superficie, per visualizzare le future costruzioni e meglio integrarle nel paesaggio.

oppure occhiali a otturatori LCD che sono ideali per la visione stereoscopica direttamente sullo schermo del computer, specie se accoppiati alla navigazione con la «*spaceball*» (*si veda l'illustrazione in basso in questa pagina*).

I prototipi virtuali dell'LHC sono disegnati usando tradizionali sistemi di CAD/CAM, come Euclid e Autocad. I modelli sono quindi estratti, ottimizzati e iniettati in un programma di navigazione in realtà virtuale. All'interno di questo programma è possibile spostare oggetti, attribuire o cambiare colori, materiali, dimensioni, e in un futuro prossimo si potrà persino dotarli di proprietà fisiche come peso, elasticità, resistenza allo sforzo, rumore, temperatura e così via. Ciò permetterà di interagire con l'ambiente virtuale in maniera ancora più realistica. Per esempio, se si lascia un oggetto a mezz'aria esso cade secondo la legge di Newton, se l'oggetto è di gomma rimbalza secondo il coefficiente di elasticità del materiale, se è di vetro si rompe, se è concavo e metallico fa «dleng», se è pieno e di legno fa probabilmente «tumpf», eccetera. Tutte queste proprietà sono formulabili tramite equazioni e parametri della dinamica, dell'acustica e dell'ottica, che il computer dovrà calcolare venti o più volte al secondo per ognuno degli oggetti visibili.

I suoni sono riproducibili attraverso sintetizzatori comandati dal computer stesso, e - per mezzo di uno «spazializzatore» - è possibile collocarli nello spazio uditivo dello spettatore. Tutto ciò al fine di aumentare la sensazione di immersione nell'ambiente virtuale. Inoltre, con l'aiuto della cinematica inversa, ben presto si potrà simulare accuratamente i movimenti dei ponti gru, dei carrelli elevatori e di altri mezzi di trasporto, sicché gli ingegneri del CERN possano visualizzare tutte le fasi di montaggio dell'LHC e delle sue aree sperimentali e provare sul prototipo virtuale diverse strategie di assemblaggio. Per ciascun componente dei futuri rivelatori, il computer calcolerà una traiettoria di discesa nel pozzo e una sequenza di assemblaggio. Tutte queste traiettorie, calcolate sul modello virtuale, saranno memorizzate e utilizzate per guidare il robot che controllerà i ponti gru al momento dell'assemblaggio reale. Questa tecnica permetterà di costruire l'LHC quasi senza ricorrere all'intervento umano, minimizzando la possibilità di errore e di conseguenza i costi.

Una disegnatrice naviga in un modello di territorio del futuro collisore. Il volo è comandato per mezzo della *spaceball*, che permette cambiamenti di velocità e di direzione a sei gradi di libertà, ottenendo riprese paragonabili a quelle da elicottero. Il senso di immersione è ottenuto usando gli occhiali a otturatore LCD, telecomandati dal computer grazie a un fascio di raggi infrarossi.

Ma i progettisti non saranno i soli ad approfittare dei prototipi virtuali di VENUS. Gli addetti alla sicurezza potranno valutare le condizioni di rischio navigando nei pozzi e, per mezzo di programmi simultanei di dinamica dei flussi, perfino simulare e osservare incidenti come incendi, allagamenti o fughe di gas, visualizzare campi magnetici, aree di elevata radioattività, flussi criogenici e ogni altra sorta di eventi o pericoli da tenere in considerazione in fase progettuale. Indossando casco e guanti elettronici le squadre d'intervento potranno allenarsi a soccorrere in realtà virtuale le vittime di incidenti, valutando quindi le condizioni di operabilità negli spazi limitati dei futuri pozzi, anni prima della loro costruzione. In ogni grande progetto ingegneristico e architettonico tutti questi aspetti devono essere valutati sin dall'inizio, nella fase di progettazione, poiché eventuali errori compiuti in questa fase si propagano in maniera esponenziale a quelle successive.

Durante la fase di realizzazione dell'LHC, la cui conclusione è prevista per il 2004, sarà possibile utilizzare la telepresenza per effettuare operazioni di manutenzione tramite robot. A causa dell'alta radioattività che le particelle accelerate indurranno nei futuri rivelatori, ogni intervento tecnico richiederebbe parecchi giorni di arresto del complesso. Inoltre un tecnico sarebbe esposto a una dose di radiazioni che limiterebbe la sua permanenza nella macchina a tempi dell'ordine di un'ora all'anno. Queste limitazioni renderebbero impossibile la formazione di tecnici esperti, e ogni operazione complessa ne richiederebbe decine. La telepresenza permette a un solo tecnico dotato di casco e guanti di operare sul modello virtuale mentre un robot replica i suoi movimenti nell'ambiente reale. Oggi si contano già parecchie decine di casi di applicazione della telepresenza in campo militare e industriale, soprattutto quando l'ambiente operativo è pericoloso o addirittura inaccessibile. Anche in medicina si contano numerosi progetti sperimentali in telepresenza. Presto i chirurghi potranno operare a distanza via satellite attraverso robot (si veda l'articolo *Il futuro della chirurgia robotica* di Alberto Rovetta in «Le Scienze» n. 327, novembre 1995). Ciò permetterà loro di intervenire su pazienti intrasportabili o in condizioni di estrema urgenza. Inoltre, grazie alla scalabilità dei modelli virtuali, è possibile compiere interventi di microchirurgia usando robot a laser ad alta precisione guidati da chirurghi in telepresenza.

Con l'emergere della realtà virtuale si sta definendo un nuovo standard di descrizione dei modelli tridimensionali attraverso il quale è possibile esplorare mondi virtuali a distanza, via Internet. A partire da un *browser* di World Wide Web è possibile caricare a distanza un mondo virtuale con un semplice click su un'immagine, e poi volarci dentro in tre

I modelli virtuali dell'esperimento ATLAS consentono di visualizzare le diverse componenti del rivelatore (*nel riquadro*), facilitando l'attività dei progettisti. Anche i responsabili della sicurezza, però, possono approfittarne, navigando nei modelli per valutare la conformità delle scale di emergenza e degli impianti e prevenire così eventuali incidenti in fase operativa.

dimensioni. Il Centro di ricerca, sviluppo e studi superiori in Sardegna (CRS4), in collaborazione col progetto VENUS, ha prodotto un browser tridimensionale che permette ai fisici di tutto il mondo di navigare nei prototipi virtuali dell'LHC usando una qualsiasi workstation Unix, e in futuro anche un PC. Questo browser, chiamato i3D, permette di collegare gli oggetti incontrati nel mondo virtuale a testi, disegni, suoni o videoclip, consentendo un accesso istantaneo a tutta l'informazione disponibile, e trasformando il mondo virtuale in un vero e proprio database mondiale navigabile in tre dimensioni. Se si pensa che gli elementi dei rivelatori dell'LHC saranno disegnati e costruiti da migliaia di fisici, ingegneri e tecnici in centinaia di istituti disseminati sul pianeta, è evidente quanto i3D possa essere utile alla comunicazione fra le collaborazioni sperimentali e all'integrazione dell'informazione tecnica in forma grafica e testuale.

Naturalmente l'uso di questo browser non si limiterà alla fisica, ma potrà servire a navigare fra modelli virtuali applicabili a ogni campo della scienza, come molecole, pianeti, città antiche, il corpo umano, progetti di architettura e via dicendo.

Tutta questa tecnologia, disponibile oggi solo nei laboratori di ricerca o nei centri d'addestramento militari statunitensi, sarà ben presto alla portata di tutti. Il mercato della realtà virtuale sta avanzando a passi giganteschi verso la *home VR*. Entro tre o quattro anni i prezzi delle unità periferiche e del software per la realtà virtuale saranno scesi a un quinto o addirittura un decimo del valore attuale. A titolo di esempio, un casco di qualità media (circa 300 000 punti) si aggirava intorno a 60 milioni solo tre anni fa, mentre oggi è quotato da 5 a 10 milioni. Per 70 milioni oggi è possibile acquistare un sistema di realtà virtuale completo, costituito da un PC Pentium e comprendente casco, mouse tridimensionale e sistema di rivelazione magnetica. Entro pochi anni questi sistemi saranno negli studi degli architetti, nei negozi di cucine componibili, negli ospedali, nelle scuole, nei musei, permettendoci di volare nella nostra futura casa spostando mobili, muri e finestre a nostro piacimento, di visitare i Fori Romani o Cartagine così come li aveva visti Giulio Cesare, o di studiare molecole e proteine in tre dimensioni.

Anche World Wide Web sta entrando in ogni ufficio e in molte case. In Italia stanno spuntando di giorno in giorno nuovi centri di accesso a Internet. All'estero, Internet è già diventata un nuovo mezzo di comunicazione multimediale omogeneo, che in molti casi ha rimpiazzato telefono e fax. Per la fine del secolo avremo in casa un *home server*, cioè un computer ad alta potenza (da 150 a 300 megahertz di frequenza) con 256 megabyte di RAM e 10 gigabyte di disco rigido. «Cliccando» su un punto del suo schermo potremo guardare un film di nostra scelta nella nostra lingua preferita e in stereovisione, programmare la lavastoviglie, ascoltare l'ultimo successo della nostra *rockstar* preferita caricandolo in diretta dal server della sua casa discografica, leggere il giornale e - cliccando sulle foto - vedere le immagini trasformarsi in brevi filmati, mandare un videomessaggio a un amico in California e, mettendo in testa il casco, scegliere un villaggio turistico alle Seychelles volandoci dentro in realtà virtuale, assistere alla distruzione di Pompei e suonare la Quinta di Beethoven sullo «spazioxofono», strumento virtuale dal suono e dalla forma sempre reinventabili.

Come punto di riferimento mondiale della ricerca in fisica, il CERN deve continuamente far fronte a sfide tecnologiche enormi per costruire macchine sempre più complesse. Per poter riuscire in imprese mai realizzate prima, gli studiosi devono avvalersi della più alta tecnologia esistente e contribuire a migliorarla per raggiungere prestazioni ai limiti del possibile. Come spesso accade, i bisogni della ricerca pura fanno nascere progetti che hanno enormi ricadute industriali e concorrono a migliorare le condizioni di vita di tutti. Lo scanner a risonanza magnetica e World Wide Web sono due esempi di ricaduta tecnologica di ricerche che hanno avuto inizio proprio al CERN. Ci auguriamo che ben presto anche VENUS possa contribuire ad accelerare lo sviluppo delle tecniche di realtà virtuale in Europa.

L'imbocco del tunnel con i primi elementi degli acceleratori e due «tecnici virtuali». Il LEP (*in alto*) è l'acceleratore del CERN correntemente in funzione. Nel 1999 sarà smontato e successivamente rimontato al di sopra del futuro LHC (*tubo blu in basso*). Questa operazione consentirà ai due acceleratori di funzionare alternativamente.

Il prototipo virtuale del rivelatore dell'esperimento ATLAS. Fra dieci anni miliardi di protoni si scontreranno 40 milioni di volte al secondo per riprodurre l'energia creatrice dell'universo.

SILVANO DE GENNARO è attualmente responsabile del progetto VENUS (di cui è anche ideatore) in corso al CERN, dove è entrato come analista subito dopo la laurea in scienze dell'informazione conseguita nel 1977 all'Università di Bari.

BRYSON S., PAUSCH R., ROBINETT W. e VAN DAM A., *Implementing Virtual Reality*, SIGGRAPH Course Notes 43, 1993.

GHEE S. e NAUGHTON-GREEN J., *Programming Virtual Worlds*, SIGGRAPH Tutorial Notes on Programming Virtual Worlds: 6. 1-6. 58, 1994.

BALAGUER J.-F. e GOBBETTI E., *i3D: a High Speed 3D Web Browser* in *Proceedings VRML '95, San Diego, California*, 1995.

DE GENNARO S., *Virtual Prototyping at CERN* in *Proceedings CHEP '95, Rio de Janeiro, Brazil*, 1995.

Il sistema immunitario cerebrale

Le cellule della microglia, oltre alla loro normale funzione protettiva, hanno una sorprendente azione lesiva che forse contribuisce a causare alcune malattie neurodegenerative e la demenza da AIDS

di Wolfgang J. Streit e Carol A. Kincaid-Colton

Le cellule microgliali (*in rosso*) allo stato di riposo sono in contatto con le cellule che le circondano e svolgono una funzione di controllo delle condizioni di queste ultime per essere in grado di reagire rapidamente a una lesione o a una malattia. Nel sistema nervoso centrale, nel quale sono disseminate, esse sono numerose quanto i neuroni.

Quando si osserva al microscopio tessuto sano di cervello o di midollo spinale, raramente vi si trovano globuli bianchi, le più note sentinelle del sistema immunitario. E per un buon motivo. Infatti i globuli bianchi, pur avendo un'azione difensiva contro le infezioni e il cancro, secernono anche sostanze in grado di uccidere i neuroni, che non sono sostituibili. L'organismo minimizza il danno impedendo la fuoriuscita delle cellule immunitarie dai vasi sanguigni e il loro ingresso nel sistema nervoso centrale; in genere i globuli bianchi riescono a penetrare nel tessuto nervoso solo in caso di lesione dei suddetti vasi avvenuta in seguito a traumi o malattie.

Queste osservazioni hanno portato alla convinzione, un tempo diffusa, che il sistema nervoso centrale non disponesse di protezione immunitaria. Invece alcuni ricercatori hanno recentemente dimostrato che un gruppo molto interessante di cellule, la microglia, forma nel sistema nervoso centrale una estesa rete con funzione difensiva. In genere, le cellule microgliali svolgono il loro compito senza danneggiare i neuroni, ma dati sempre più numerosi indicano che, di tanto in tanto, possono perdere il loro carattere benefico. In effetti, sembra che la microglia possa contribuire a determinare o a esacerbare parecchie patologie invalidanti come l'ischemia cerebrale, la malattia di Alzheimer, la sclerosi multipla e altre malattie neurodegenerative.

La microglia appartiene a una classe di cellule, la glia (termine che deriva dal greco e significa «colla»), riconosciuta per la prima volta agli inizi del secolo scorso. In un primo tempo i biologi pensarono erroneamente che si trattasse di un singolo tipo cellulare, il cui compito per nulla interessante fosse quello di fare da mastice tra i neuroni del cervello e del midollo spinale. Ma, entro i primi due decenni di questo secolo erano stati identificati al microscopio tre tipi di cellule gliali: gli astrociti, gli oligodendrociti e la microglia. A partire dagli anni settanta divenne evidente che almeno i primi due tipi avevano compiti di grande importanza.

Per esempio, si è visto che le cellule con il corpo cellulare più voluminoso, gli astrociti (così chiamati perché hanno forma di stella), esercitano un'azione protettiva sui neuroni, fagocitando le molecole neurotrasmettitrici in eccesso e impedendo così una stimolazione troppo intensa (si veda l'articolo *Gli astrociti* di Harold K. Kimelberg e Michael D. Norenberg in «Le Scienze» n. 250, giugno 1989). È stato anche dimostrato che gli oligodendrociti, il secondo gruppo di cellule gliali in ordine di grandezza, producono la guaina mielinica che isola gli assoni (le lunghe proiezioni che partono dal corpo cellulare dei neuroni e trasportano i segnali elettrici). Alcuni ricercatori hanno poi ipotizzato che le cellule più piccole, quelle della microglia, avessero uno speciale ruolo immunologico, ma fino agli anni ottanta non sono stati disponibili gli strumenti necessari per avvalorare questa supposizione.

L'idea è nata in primo luogo dalle ricerche intensive svolte all'inizio di questo secolo da Pio del Río-Hortega, allievo del famoso neuroanatomista spagnolo Santiago Ramón y Cajal. Nel 1919 del Río-Hortega mise a punto un colorante a base di carbonato di argento che permetteva di distinguere, in sezioni sottili di cervello di mammifero, la microglia dai neuroni, dagli astrociti e dagli oligodendrociti. Trascorse poi oltre un decennio a studiare nel massimo dettaglio queste strane cellule.

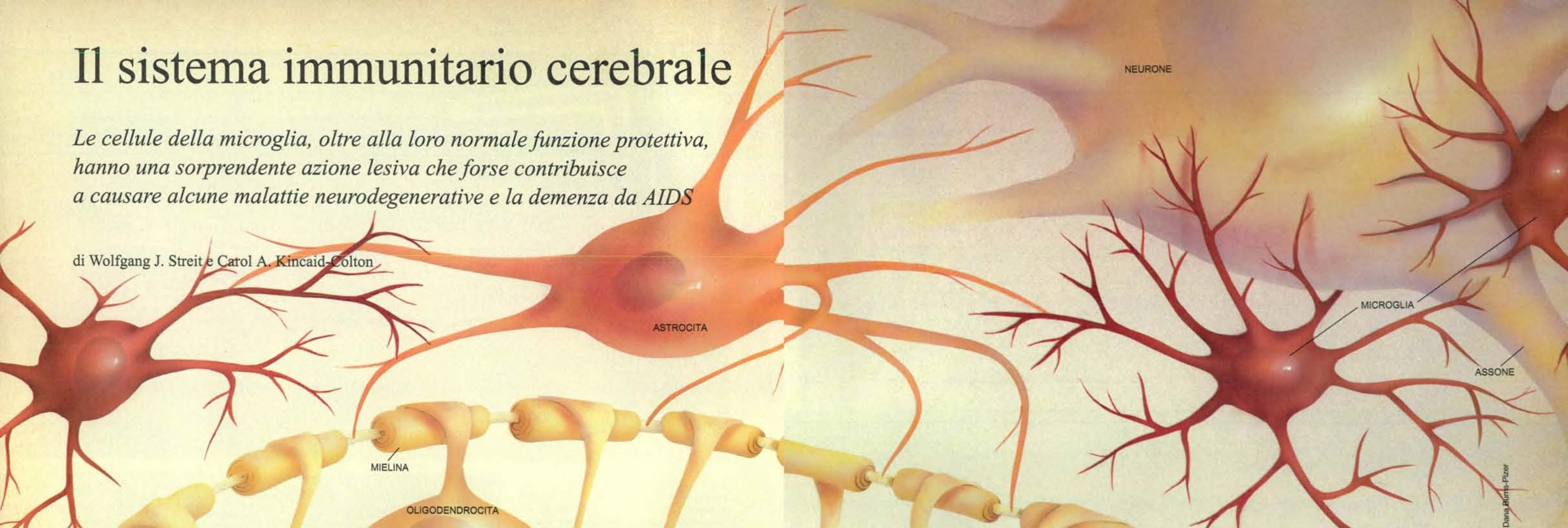
Poté così determinare che durante lo sviluppo embrionale le cellule della microglia compaiono nel cervello come corpi amorfi, i quali in seguito si differenziano in forme ampiamente ramificate che occupano ogni zona del cervello ed entrano in contatto con i neuroni e gli astrociti (ma non si toccano mai tra di loro). Osservò anche che le cellule della microglia reagiscono in maniera molto vistosa quando il cervello subisce una grave lesione: per esempio, in risposta a una ferita da taglio, le cellule microgliali ritraggono le delicate ramificazioni e sembrano riassumere la conformazione immatura arrotondata.

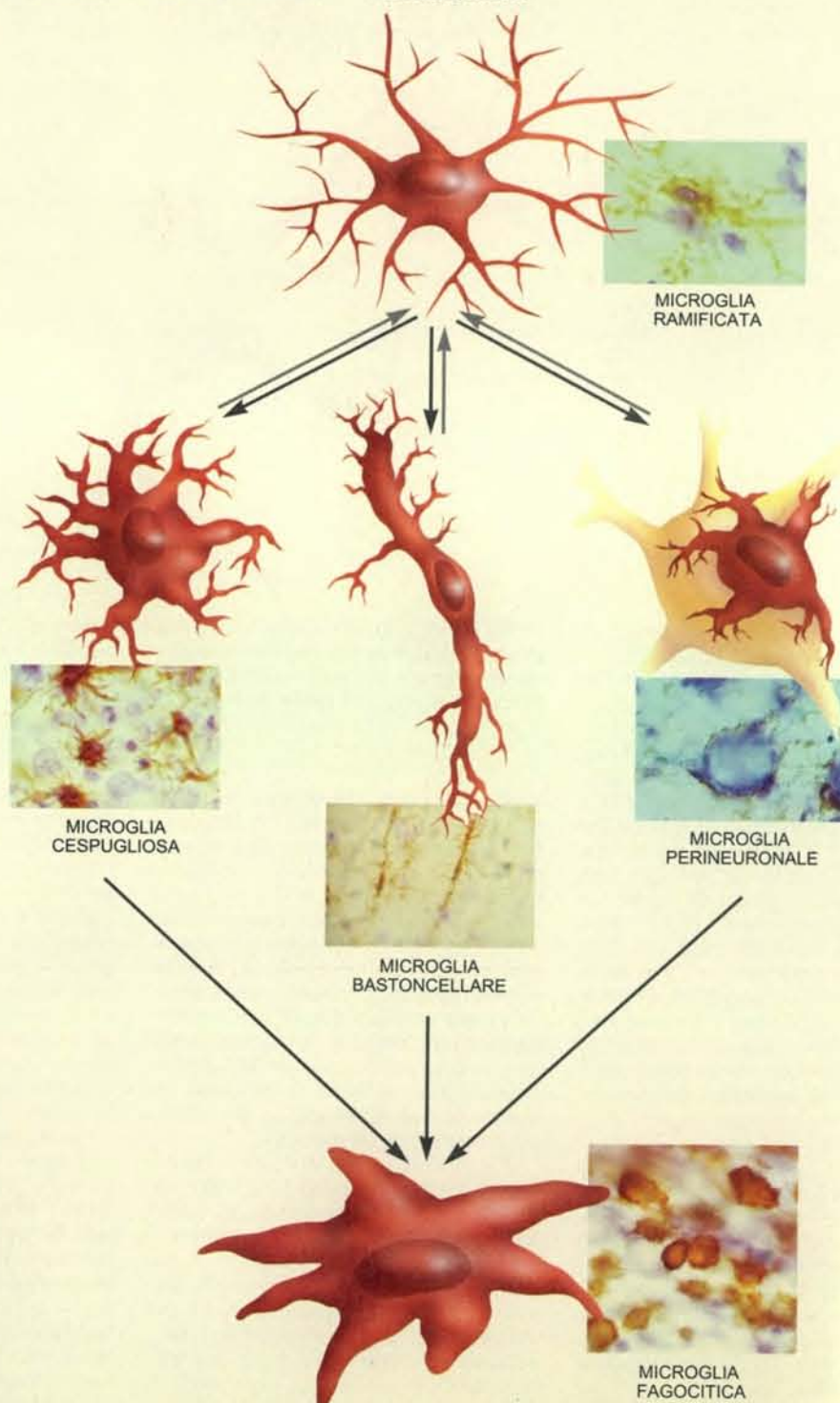
Del Río-Hortega si accorse che le cellule microgliali in questo stato assomigliano ai macrofagi, un tipo di globuli bianchi presente nei tessuti al di fuori del cervello. Quando avvertono la presenza di una lesione o di un'infezione, i macrofagi migrano verso le aree colpite, proliferano e sviluppano un'attività fagocitaria intensa: diventano cioè cellule «spazzine» in grado di ingerire e degradare microrganismi, cellule morenti e detriti vari. Nel 1932 del Río-Hortega poté proporre che l'assunzione della forma rotondeggiante da parte delle cellule microgliali riflettesse una metamorfosi verso uno stato fagocitario: in altre parole, le cellule microgliali fungerebbero da macrofagi del sistema nervoso centrale.

Anche se le idee di del Río-Hortega avevano fondamento, pochi ricercatori proseguirono questi studi nei cinquant'anni successivi, in gran parte a causa dell'inaffidabilità del metodo di colorazione da lui adottato. Senza un mezzo sicuro per distinguere la microglia dalle altre cellule, era impossibile determinare quale fosse la funzione delle cellule microgliali. Questa barriera è caduta solo negli anni ottanta, dopo che V. Hugh Perry e collaboratori dell'Università di Oxford hanno cominciato a selezionare anticorpi monoclonali in grado di legarsi alla microglia. Gli anticorpi monoclonali hanno la capacità di riconoscere un bersaglio proteico, o antigene, molto specifico. Perry e il suo gruppo hanno compreso che, se avessero trovato anticorpi in grado di fissarsi alla microglia ma non ad altre cellule del sistema nervoso centrale, avrebbero potuto sfruttarli come un nuovo tipo di «colorante». Sarebbe stato possibile distinguere la microglia dalle altre cellule semplicemente fissando alla molecola di anticorpo un marcatore ben riconoscibile, per esempio un composto fluorescente.

Nel 1985 il gruppo di Perry dimostrò che vari anticorpi monoclonali ottenuti da altri ricercatori potevano in effetti individuare le cellule microgliali nel tessuto cerebrale. Ben presto si è reso disponibile un numero ancora più elevato di anticorpi in grado di assolvere questo compito; la loro introduzione - assieme all'avvento, alla metà degli anni ottanta, di metodi per mantenere in coltura popolazioni pure di microglia - ha permesso finalmente di esaminare in dettaglio le attività di queste cellule.

Oltre a fornire un metodo per distinguere la microglia, gli anticorpi monoclonali hanno anche dato conferma all'ipotesi che le cellule microgliali possano svolgere un'attività immunitaria nel cervello e nel midollo spinale. In particolare diversi anticorpi che riconoscono proteine presenti esclusivamente su cellule del sistema immunitario sono riusciti a trovare i loro bersagli sulla microglia. Inoltre alcuni di questi anticorpi hanno permesso di dimostrare che le cellule microgliali si comportano probabilmente come macrofagi.

I macrofagi e alcune cellule loro affini espongono gli antigeni: cioè tagliano le proteine prodotte dai microrganismi invasori ed esibiscono i peptidi così ottenuti in «vetrine» molecolari, gli antigeni di classe II del maggior complesso di istocompatibilità (MHC). Questo processo induce altre cellule immunitarie a lanciare un attacco a tutto campo contro un invasore. Tra il 1985 e il 1989 ricercatori di tutto il mondo hanno dimostrato che gli anticorpi monoclonali in grado di legarsi agli antigeni MHC di classe II spesso si legano bene anche alla micro-

I molti aspetti della microglia

La microglia (*in giallo-bruno nelle microfotografie*) si trova generalmente nello stato di riposo altamente ramificato; quando però le cellule avvertono che un neurone è in difficoltà, cominciano a ritrarre i prolungamenti e migrano verso la sede del pericolo, assumendo una nuova conformazione. La loro forma esatta dipende in genere dalla struttura della regione cerebrale in cui la microglia è localizzata. Se le cellule hanno spazio sufficiente, possono diventare cespugliose, mentre, se devono insinuarsi tra lunghi e sottili prolungamenti neuronali, tendono ad assumere una forma bastoncellare. Altre volte esse preferiscono conformarsi alla superficie dei neuroni lesi, come avviene nel caso in cui vengano danneggiati neuroni motori. Se i neuroni colpiti riescono a recuperare la loro integrità, la microglia può ritornare allo stato di riposo (*frecce in grigio*); se invece essi muoiono, la microglia si porta in uno stato fagocitico e cerca attivamente di rimuovere il materiale morto.

Dana Burns-Pizer (disegno); Wolfgang J. Streit (microfotografie)

glia. Questo comportamento sta a significare che, contrariamente all'opinione prevalente, le cellule della microglia producono antigeni MHC di classe II; pertanto anch'esse sono probabilmente cellule che espongono antigeni.

Questi risultati concordavano con quelli derivanti dalle ricerche di Georg W. Kreutzberg e collaboratori del Max-Planck-Institut für Psychiatrie a Martinsried, in Germania. Il gruppo tedesco, uno dei pochi a interessarsi da tempo alle funzioni della microglia, ha valutato fino a che punto le cellule microgliali del cervello di roditori fossero in grado di comportarsi come macrofagi quando venivano messe in presenza di neuroni gravemente lesi. Nel contempo Kreutzberg e collaboratori hanno analizzato a fondo l'affermazione fatta in precedenza da altri, secondo cui la microglia non sarebbe affatto una parte del sistema nervoso centrale, non essendo altro che un insieme di monociti confluiti nel cervello o nel midollo spinale in seguito a lesioni dei vasi sanguigni nel tessuto nervoso. È stato difficile confutare quest'ultima affermazione, in quanto, allora come oggi, gli anticorpi e i coloranti specifici per la microglia riconoscevano anche i macrofagi derivati dai monociti presenti nel sangue.

Kreutzberg e collaboratori hanno usato un metodo semplice per chiarire entrambi i punti. Dapprima si sono concentrati su neuroni i cui corpi cellulari erano localizzati nel cervello, ma i cui assoni terminavano al di fuori di esso, nei muscoli. Hanno iniettato una tossina in un punto vicino alle estremità assoniche, consentendole di diffondere lungo i neuroni e di ucciderli, senza però danneggiare alcun vaso sanguigno. Questo accorgimento ha dato loro la certezza che qualsiasi cellula in grado di reagire al danno in maniera simile ai macrofagi avesse la sua sede naturale nel tessuto cerebrale e non fosse un'intrusa proveniente dal sangue. Per finire, essi hanno esaminato la regione cerebrale contenente i residui delle cellule nervose danneggiate. Le analisi sui tessuti di molti animali hanno rivelato che, in effetti, le cellule della microglia migrano verso i neuroni morti, proliferano e li eliminano. In breve, esse sono i macrofagi specifici del cervello.

Esperimenti compiuti su popolazioni pure di cellule microgliali *in vitro* hanno poi contribuito a convincere anche gli scettici più incalliti che queste cellule hanno proprio la funzione immunitaria ipotizzata da del Río-Hortega. Questi studi hanno confermato che si tratta di elementi estremamente mobili, una proprietà essenziale per cellule che devono presumibilmente raggiungere con facilità le zone lese all'interno del cervello; hanno anche permesso di stabilire che si può indurre la produzione di una vasta schiera di composti chimici da parte della microglia, composti che in altri tessuti sono sintetizzati dai macrofagi.

La ricerca moderna ha, dunque, finito per confermare la convinzione di del Río-Hortega che la microglia avesse proprietà immunologiche, ma ha anche permesso di chiarire il funzionamento delle cellule microgliali nel sistema nervoso centrale integro.

La microglia ha un ruolo decisivo per il corretto sviluppo dell'embrione. Può infatti secernere fattori di crescita importanti per la formazione del sistema nervoso centrale, ma ha anche un altro ruolo, che è stato identificato in modo più preciso. Il feto che cresce genera un numero di neuroni e di cellule gliali di gran lunga eccedenti le sue reali necessità. Con il passare del tempo, le cellule non utilizzate muoiono e vengono eliminate dalle giovani cellule microgliali, che hanno ancora la loro conformazione iniziale non ramificata.

Allorché la formazione del sistema nervoso centrale è completata, cessa la necessità di degradare grandi quantità di cellule e la microglia si differenzia assumendo la conformazione a riposo, ampiamente ramificata, la quale consente a queste cellule di mantenere uno stretto controllo sulle condizioni delle vicine. Non si sa ancora molto sulle altre funzioni della microglia a riposo, ma prove indirette fanno pensare che le cellule microgliali liberino bassi livelli di fattori di crescita i quali, in questo stadio, favorirebbero la sopravvivenza dei neuroni maturi e della glia. Queste sostanze includerebbero il fattore di crescita dei fibroblasti e il fattore di crescita delle cellule nervose, due proteine che si è riusciti a far sintetizzare a cellule microgliali *in vitro*.

Ciò di cui siamo più sicuri è che la microglia a riposo reagisce quasi istantaneamente (in pochi minuti) a perturbazioni del suo microambiente e si prepara a circondare eventuali cellule danneggiate. I segni visibili di una simile attivazione consistono nella retrazione delle ramificazioni, in altri cambiamenti di forma, nella produzione di proteine che non sono presenti nello stato di riposo e in un incremento della sintesi delle proteine che in precedenza erano prodotte soltanto in piccole quantità. Per esempio, l'espressione degli antigeni del maggior complesso di istocompatibilità è decisamente potenziata. Non sappiamo ancora se le cellule microgliali liberino quantità più elevate di fattori di crescita, ma è possibile che lo facciano nel tentativo di riparare i neuroni lesi.

Sembra che la conformazione delle cellule microgliali appena attivate dipenda in larga misura dalla struttura della zona in cui si trovano. Se questa è principalmente occupata da assoni, le cellule tendono a diventare lunghe e sottili, in modo da potersi inserire tra un filamento e l'altro; se invece c'è spazio di manovra sufficiente, come accade in buona parte del cervello, le cellule assumono spesso un aspetto cespuglioso.

Le cellule microgliali attivate non svolgono automaticamente un'azione fagocitaria: possono invece ritornare allo stato di riposo se la lesione che hanno scoperto è di lieve entità o reversibile. Se, viceversa, la lesione è grave e provoca la morte dei neuroni, le cellule microgliali cominciano a funzionare come macrofagi veri e propri capaci di fagocitare. Il destino ultimo dei fagociti non è chiaro, ma ricerche compiute su cellule microgliali sia *in vitro* sia *in vivo* fanno pensare che talvolta essi danneggino i neuroni che dovrebbero invece proteggere.

Il sospetto che la microglia possa contribuire alla comparsa di alterazioni neurologiche è nato in parte dalla scoperta sopra menzionata, secondo cui essa può liberare molte delle stesse sostanze che sono emesse dai macrofagi presenti all'esterno del sistema nervoso. Alcune di queste sostanze sono dannose per le cellule e, se vengono prodotte in quantità eccessive, possono sicuramente uccidere i neuroni. Per esempio, uno di noi (Kincaid-Colton) e collaboratori della Georgetown University hanno trovato che, quando vengono messe in presenza di particolari componenti batterici *in vitro*, le cellule microgliali attivate generano, analogamente ad altri macrofagi, specie ossigenate reattive quali l'anione superossido, il radicale ossidrile (uno dei composti più tossici presenti nell'organismo) e il perossido di idrogeno. Si tratta di molecole estremamente distruttive che, oltre a uccidere i microrganismi, possono danneggiare le membrane, le proteine e il DNA nei neuroni e in altre cellule.

Ulteriori composti potenzialmente distruttivi prodotti dalle cellule microgliali fortemente attivate e da altri macrofagi includono enzimi che digeriscono le proteine (proteasi) e possono perforare le membrane cellulari, nonché almeno due citochine, versatili molecole messaggere che possono aggravare l'infiammazione. Le citochine - che comprendono l'interleuchina 1 e il fattore di necrosi tumorale - contribuiscono spesso a reclutare altre componenti del sistema immunitario verso la sede di una lesione (si veda l'articolo *Il fattore di necrosi tumorale* di Lloyd J. Old in «Le Scienze» n. 239, luglio 1988). L'infiammazione può avere un ruolo importante nell'eliminazione di infezioni e di forme incipienti di cancro, ma può anche avere gravi effetti collaterali e danneggiare cellule non infettate. In alcune circostanze le citochine possono arrecare un danno diretto ai neuroni, e il fattore di necrosi tumorale può uccidere gli oligodendrociti.

Il fatto che la microglia sia in grado di sintetizzare tutte queste sostanze *in vitro* non è una prova che le sue cellule possano danneggiare il cervello *in vivo*. In effetti il sistema nervoso centrale tiene la microglia sotto stretto controllo, costringendola a produrre un livello minimo di secrezioni, anche quando si tratta di reagire a una lesione o a una malattia; altrimenti nessuno potrebbe sopravvivere,

visto che la microglia è presente in ogni parte del cervello. Cionondimeno, ricerche compiute su numerose alterazioni neurologiche inducono a pensare che in alcuni pazienti questo controllo sia ridotto, o perché esiste un difetto nelle cellule microgliali stesse o perché qualche altro processo patologico vanifica i normali controlli sul comportamento cellulare.

Un'attività eccessiva delle cellule microgliali è stata chiamata in causa per spiegare la demenza che talvolta insorge nei pazienti affetti da AIDS. Il virus dell'immunodeficienza umana non attacca i neuroni, ma infetta la microglia. È stato dimostrato che questa invasione virale stimola le cellule microgliali a produrre elevati livelli di citochine infiammatorie e altre molecole tossiche per i neuroni.

Un'alterazione dei meccanismi regolatori della microglia potrebbe intervenire anche nella malattia di Alzheimer. Il cervello dei pazienti affetti da questa patologia è caratterizzato dalla presenza di numerose placche senili, ossia regioni anomale in cui depositi proteici di beta-amiloide sono mescolati a microglia, astrociti e terminazioni di neuroni lesi. Si ritiene che queste placche siano una causa della distruzione dei neuroni che è alla base del deterioramento della funzione mentale. Non è chiaro come esse danneggino le cellule nervose: la questione è oggetto di un acceso dibattito. Molti ricercatori ritengono che la causa del danno sia la beta-amiloide; noi pensiamo che essa potrebbe agire principalmente sulla microglia. Per esempio, è evidente che nelle placche senili vi sono elevati livelli di interleuchina 1 e di altre citochine, di cui è nota la produzione da parte della microglia. Ciò implica che qualche cosa (forse la beta-amiloide) porti la microglia presente nelle placche in uno stato estremamente attivato. In queste condizioni le cellule presumibilmente liberano specie ossigenate ed enzimi proteolitici e possono in tal modo danneggiare i neuroni.

Altri risultati fanno pensare che la microglia potrebbe addirittura contribuire alla formazione delle placche. Sembra che le cellule microgliali reagiscano alle lesioni del sistema nervoso centrale producendo una forma del precursore proteico dell'amiloide, cioè quella molecola che, quando viene scissa in un modo particolare, dà origine al frammento beta-amiloide. Inoltre studi effettuati su cellule *in vitro* hanno dimostrato che l'interleuchina 1 induce varie altre cellule - probabilmente anche i neuroni - a sintetizzare precursori della beta-amiloide. Infine, le specie ossigenate reattive prodotte dalla microglia attivata promuovono l'aggregazione dei frammenti di proteina amiloide.

È facile immaginare che possa insorgere un circolo vizioso dopo che qualche agente innescante ha portato la microglia in uno stato iperattivo. Se le cellule microgliali sintetizzassero il precursore dell'amiloide, le loro proteasi potrebbero scinderlo e dar luogo alla beta-amiloide. Nel contempo, l'interleuchina 1 potrebbe indurre altre cellule a produrre anch'esse proteina amiloide. Quindi le specie ossigenate reattive potrebbero fare agglutinare assieme le molecole di proteina amiloide liberate dalla microglia o dalle cellule vicine. Questa agglutinazione, a sua volta, potrebbe portare all'attivazione di altre cellule microgliali, alla produzione di altra proteina amiloide, alla formazione di un maggior numero di placche e così via.

Anche gli individui affetti da sindrome di Down presentano un numero elevato di placche senili nel cervello, ma queste si formano più precocemente che non nei malati di Alzheimer. Poiché nelle due patologie i cambiamenti a carico del cervello sono molto simili, uno degli autori (Carol Kincaid-Colton) e collaboratori hanno cominciato a esaminare la possibilità che in questi pazienti la microglia danneggi il tessuto cerebrale. Essi hanno scoperto alcuni elementi a favore di questa ipotesi studiando topi con un difetto genetico analogo a quello che nell'uomo è responsabile della sindrome di Down. Nei feti di questi topi la microglia è insolitamente attiva e abbondante; nei topi «Down», inoltre, essa libera quantità particolarmente elevate di specie ossigenate reattive, di interleuchina 1 e di altre citochine che potrebbero influire negativamente sul tessuto nervoso.

In base a esperimenti eseguiti su ratti da uno di noi (Streit) e collaboratori dell'Università della Florida, anche i pazienti colpiti da ischemia cerebrale potrebbero perdere neuroni a causa di una microglia troppo attiva. Quando un vaso sanguigno importante che irrora il prosencefalo viene ostruito, il tessuto cerebrale che dipende da esso degenera rapidamente. Successivamente muoiono anche i neuroni particolarmente vulnerabili di una parte dell'area circostante, la regione CA1 dell'ippocampo. Il gruppo di Streit ha fatto una scoperta interessante: la microglia si attiva entro pochi minuti dall'instaurarsi dell'ictus, cioè molto prima che muoiano i neuroni dell'ippocampo. (Questa attivazione è resa evidente dai cambiamenti nella forma delle cellule e da una maggiore colorabilità.) Si può immaginare che la microglia, avvertendo il pericolo, tenti di proteggere i neuroni, forse avviando o incrementando la secrezione di fattori di crescita potenzialmente in grado di riparare le lesioni. È ugualmente probabile, tuttavia, che il chimismo alterato che si instaura nella zona finisca per allentare i normali freni sul comportamento della microglia, portandone le cellule in uno stato in cui diventano pericolose.

Dati preliminari indicano anche un possibile contributo della microglia alla sclerosi multipla, al morbo di Parkinson e alla sclerosi amiotrofica laterale (malattia di Lou Gehrig). Inoltre la microglia si modifica con l'età, come risulta evidente dall'elevato numero di antigeni del maggior complesso di istocompatibilità che le sue cellule espongono. Questo fenomeno potrebbe segnalare che, con il passare del tempo, si ha un allentamento dei meccanismi che si oppongono all'instaurarsi di uno stato di elevata attività. La diminuzione di questi controlli promuoverebbe indubbiamente la distruzione dei neuroni e potrebbe così contribuire a un declino della memoria e alla comparsa della senilità.

Buona parte delle ricerche sul legame tra microglia e patologie cerebrali presenta le cellule della microglia come elementi potenzialmente dannosi, ma i dati che stanno emergendo hanno anche alcune implicazioni incoraggianti. Se le cellule microgliali hanno effettivamente un ruolo centrale nelle malattie neurologiche, inibendole specificamente o bloccando l'attività dei loro prodotti si dovrebbe poter alleviare queste patologie. Terapie farmacologiche mirate sono già in sperimentazione su pazienti affetti dalla malattia di Alzheimer. Per esempio, si stanno conducendo sperimentazioni cliniche per esaminare la sicurezza e l'efficacia di un antinfiammatorio in grado di ridurre l'attività della microglia. Per contro, si sta anche studiando come sfruttare le funzioni protettive delle cellule microgliali e accrescere la produzione dei fattori di crescita da parte di queste cellule.

Dieci anni fa alcuni ricercatori negavano addirittura l'esistenza della microglia. Cinque anni fa la maggior parte dei medici avrebbe riso se qualcuno avesse proposto che le cellule microgliali potevano avere un ruolo importante nella malattia di Alzheimer e in altre patologie degenerative del cervello. Oggi questo scetticismo si va dissolvendo: sono ormai in molti a pensare che lo studio della microglia finirà per offrire nuove terapie contro alcune delle più strazianti malattie che affliggono l'umanità.

La controversa origine della microglia

Nel 1932, Pio del Río-Hortega, il pioniere delle ricerche sulla microglia, diede inizio a una controversia che per oltre 50 anni ha investito la maggior parte dei ricercatori interessati all'argomento. Nello stesso articolo in cui proponeva che le cellule microgliali fossero i difensori immunitari e gli «spazzini» del sistema nervoso centrale, egli suggerì che la loro origine non fosse da cercare nello stesso tessuto embrionale (l'ectoderma) che genera le cellule nervose; concluse invece che la microglia deriva dal mesoderma, cioè da quello strato di cellule germinali embrionali che forma il midollo osseo, il sangue, i vasi sanguigni e il sistema linfatico. Tuttavia non riuscì a stabilire quale fosse l'esatta linea di discendenza mesodermica delle cellule microgliali. Esse discendevano forse dai monociti e penetravano nel cervello e nel midollo spinale dal circolo sanguigno fetale? Oppure discendevano da «cugini» dei monociti non presenti in circolo e migravano poi direttamente verso il sistema nervoso centrale, senza passare attraverso la circolazione sanguigna?

Per un certo periodo quella dell'origine monocitica è stata l'ipotesi più accreditata; secondo l'opinione della maggioranza, i precursori delle cellule microgliali erano monociti attratti verso il sistema nervoso in via di sviluppo da neuroni morti durante lo sviluppo del cervello e del midollo spinale. Ma nuovi risultati contraddicono questa idea. Per esempio, Jutta Schnitzer del Centro Max Delbrück di medicina molecolare a Berlino e Ken W. S. Ashwell dell'Università di Sydney in Australia hanno dimostrato che la retina, la quale fa parte del sistema nervoso centrale, contiene disseminate nella propria struttura molte cellule microgliali già in una fase precoce dello sviluppo, molto prima che i neuroni comincino a morire. Di fatto, i risultati delle ricerche depongono attualmente a favore della seconda ipotesi.

La fotografia qui accanto è stata scattata nel 1924 da Wilder G. Penfield, prima che egli stesso diventasse celebre come neurochirurgo.

Per gentile concessione di William Feindel, *The Penfield Archive*

Pio del Río-Hortega

I prodotti della microglia: armi a doppio taglio

Prodotto	Effetti benefici	Effetti dannosi
Precursore proteico della beta-amiloide	Ignoti	In seguito a scissione può dare origine al frammento beta-amiloide
Citochine (messaggeri del sistema immunitario)	Reclutano altre cellule verso le sedi di infezione; alcune promuovono la sopravvivenza e la riparazione degli astrociti; alcune combattono i tumori	Possono danneggiare cellule sane e indurre altre cellule immunitarie a secernere sostanze che danneggiano le cellule
Fattori di crescita	Promuovono la sopravvivenza e la riparazione dei neuroni	Ignoti
Enzimi proteolitici	Contribuiscono a degradare i microrganismi e le cellule lese	Possono degradare le membrane delle cellule sane; possono contribuire alla formazione di beta-amiloide
Specie ossigenate reattive	Possono danneggiare le membrane, le proteine e il DNA nei microrganismi	Possono danneggiare le cellule sane; possono promuovere l'aggregazione di beta-amiloide

Haruhiko Akiyama, Tokyo Institute of Psychiatry

Si ritiene che le placche senili (*aree rotondeggianti nella microfotografia*) provochino i danni a carico dei neuroni che sono alla base della perdita di memoria nei pazienti affetti dalla malattia di Alzheimer e dalla sindrome di Down. Il nucleo delle placche è costituito principalmente da beta-amiloide (*in rosso*), una proteina notoriamente dannosa per i neuroni, e da microglia (*in nero*); esse includono anche altre cellule gliali, gli astrociti (*«stelle» giallo-brune*), oltre ad assoni e dendriti danneggiati (*non visibili*). Dati recenti fanno pensare che la formazione delle placche sia promossa dalla microglia. Può anche darsi che le cellule microgliali attivate danneggino direttamente i neuroni secernendo sostanze tossiche, alcune delle quali sono elencate nella tabella.

WOLFGANG J. STREIT e CAROL A. KINCAID-COLTON sono rispettivamente professore associato di neuroscienze al Brain Institute dell'Università della Florida e professore associato di fisiologia e biofisica alla School of Medicine della Georgetown University.

STREIT W. J., GRAEBER M. B. e KREUTZBERG G. W., *Functional Plasticity of Microglia: A Review* in «Glia», 1, n. 5, maggio 1988.

GRAEBER M. B., KREUTZBERG G. W. e STREIT W. J. (a cura), *Microglia*, numero speciale di «Glia», 7, n. 1, gennaio 1993.

KETTENMANN H. e RANSOM B. R. (a cura), *Neuroglia*, Oxford University Press, 1995.

Memorie olografiche

A trent'anni dalle prime ipotesi di fattibilità, i ricercatori sono finalmente sul punto di impiegare gli ologrammi per immagazzinare dati in memorie enormemente capaci ed estremamente veloci

di Demetri Psaltis e Fai Mok

L'immagazzinamento di dati in memorie ottiche è stato uno dei punti focali della tecnologia negli ultimi quindici anni. I compact disc, per esempio, dominano il mercato delle registrazioni musicali, e oggi sono diventati anche il supporto standard per realizzazioni multimediali che combinano testi, immagini e suoni. Videogiochi, interi giornali, enciclopedie e mappe sono alcuni dei prodotti disponibili su compact disc per gli utenti di personal computer.

Senza dubbio, le memorie ottiche contengono enormi quantità di informazioni in forma digitale, in modo economico e conveniente. Un compact disc può contenere 640 milioni di byte, abbastanza per registrare un'ora e un quarto di musica ad alta fedeltà o più di 300 000 pagine di testo. I segnali di mercato, tuttavia, indicano che queste grandi memorie hanno stimolato la domanda di mezzi ancora più capaci ed economici. I dirigenti delle società che realizzano prodotti per l'intrattenimento vorrebbero collocare uno o più film su dischi ottici delle stesse dimensioni di un compact disc, e le esigenze di archivio di ospedali, tribunali, agenzie governative e biblioteche sono così grandi che questi istituti si sono rivolti ai cosiddetti *juke-box*, gruppi di compact disc dotati di bracci robotici in grado di accedere in breve tempo a uno qualsiasi tra centinaia di dischi.

La risposta dei progettisti si è limitata al tentativo di ottimizzare i sistemi CD esistenti. Alcuni lavorano su laser a semiconduttori di lunghezza d'onda più corta (il che permetterebbe di allocare i bit su un CD a distanza più vicina e dunque di disporre di una memoria maggiore). Altri stanno studiando tecniche di compressione dei dati e di «super-risoluzione», il che ancora consentirebbe una maggiore densità di dati (al prezzo, comunque, di un maggior rumore di fondo). Un altro promettente sviluppo è stato il CD a livelli multipli, che viene caricato con due o più tracce di dati lette da un sistema ottico in grado di mettere a fuoco un livello per volta. Ci si aspetta che tecniche di questo genere possano spingere la capacità dei CD a decine di miliardi di byte nel volgere di cinque anni o poco più.

Inserire in un disco del formato di un CD molti più dati - dell'ordine del centinaio di miliardi di byte - richiederebbe però un approccio fondamentalmente diverso: l'olografia. L'idea risale al 1963, allorché Pieter J. van Heerden, della Polaroid, propose per primo di immagazzinare dati in tre dimensioni.

Si reputa che le memorie olografiche abbiano la possibilità di contenere centinaia di miliardi di byte di informazioni, trasferirli a una velocità di un miliardo di bit al secondo, o anche più, e selezionare un elemento di informazione a caso in 100 microsecondi o meno. Non vi è altra tecnologia per le memorie così prossima alla commercializzazione che offra tutti questi vantaggi. Per questo - negli ultimi due anni - società come Rockwell, IBM e GTE si sono trovate quasi costrette ad avviare o aumentare gli sforzi per sviluppare memorie olografiche.

Inizialmente, il costo e la novità confineranno probabilmente questa tecnologia a un numero ristretto di applicazioni specializzate in cui siano necessarie capacità di memoria e velocità straordinarie. (Del resto qualche piccola nicchia di utenza basata su questi requisiti esiste già: un sistema recentemente commercializzato, per esempio, immagazzina olograficamente le impronte digitali delle persone autorizzate ad accedere in un'area riservata, consentendo l'ingresso solo quando un dito «autorizzato» viene appoggiato su una lastra di vetro.) Quando però la tecnologia maturerà e diventerà meno costosa, potrebbe sopravanzare il disco ottico nella veste di memoria digitale ad alta capacità per calcolatori.

I vantaggi principali di questa tecnologia derivano dalla registrazione tridimensionale e dalla lettura simultanea di un'intera pagina di dati per volta. Caratteristica assolutamente unica, le memorie olografiche immagazzinano ogni bit nella forma di schema d'interferenza attraverso l'intero volume del mezzo.

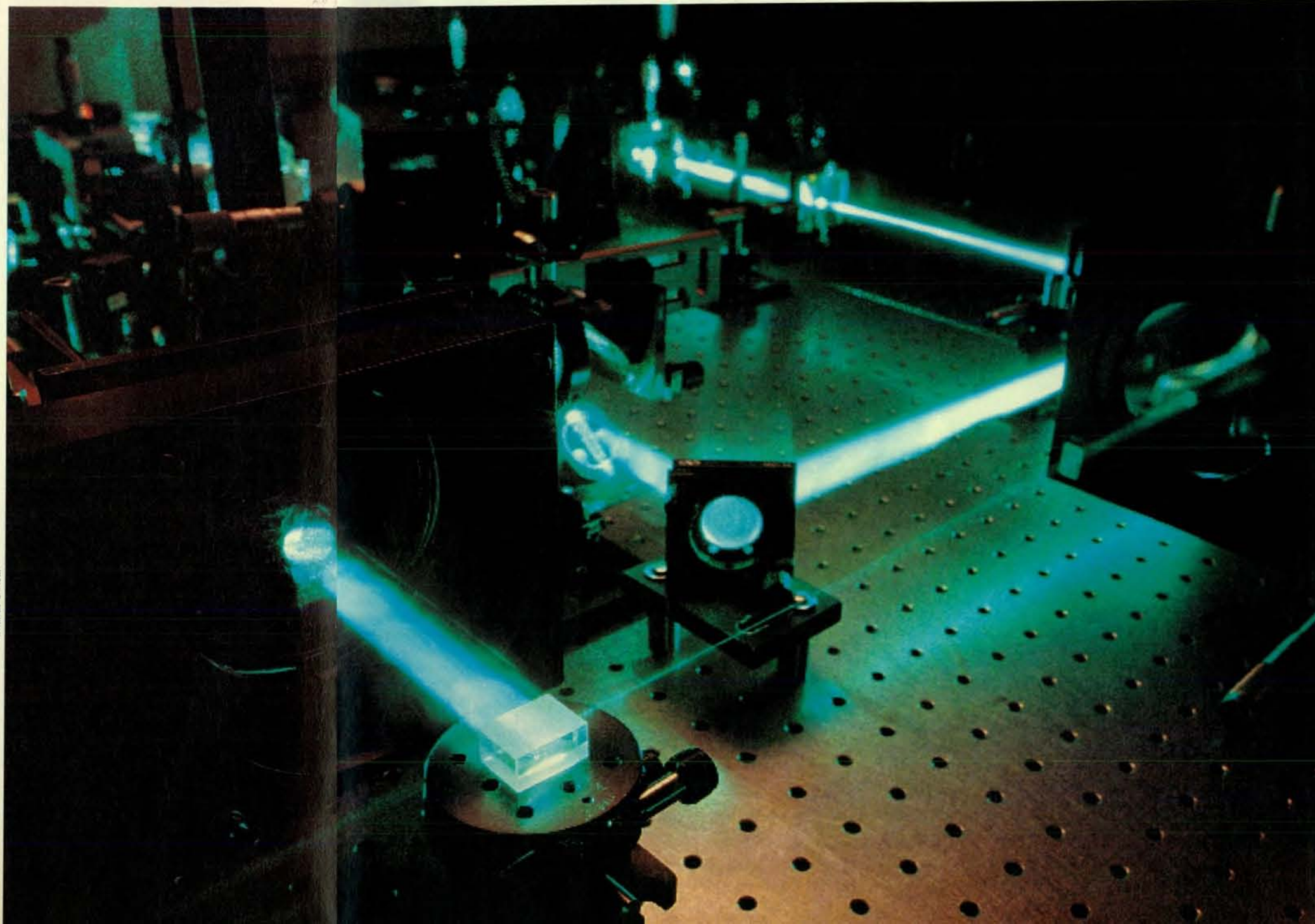
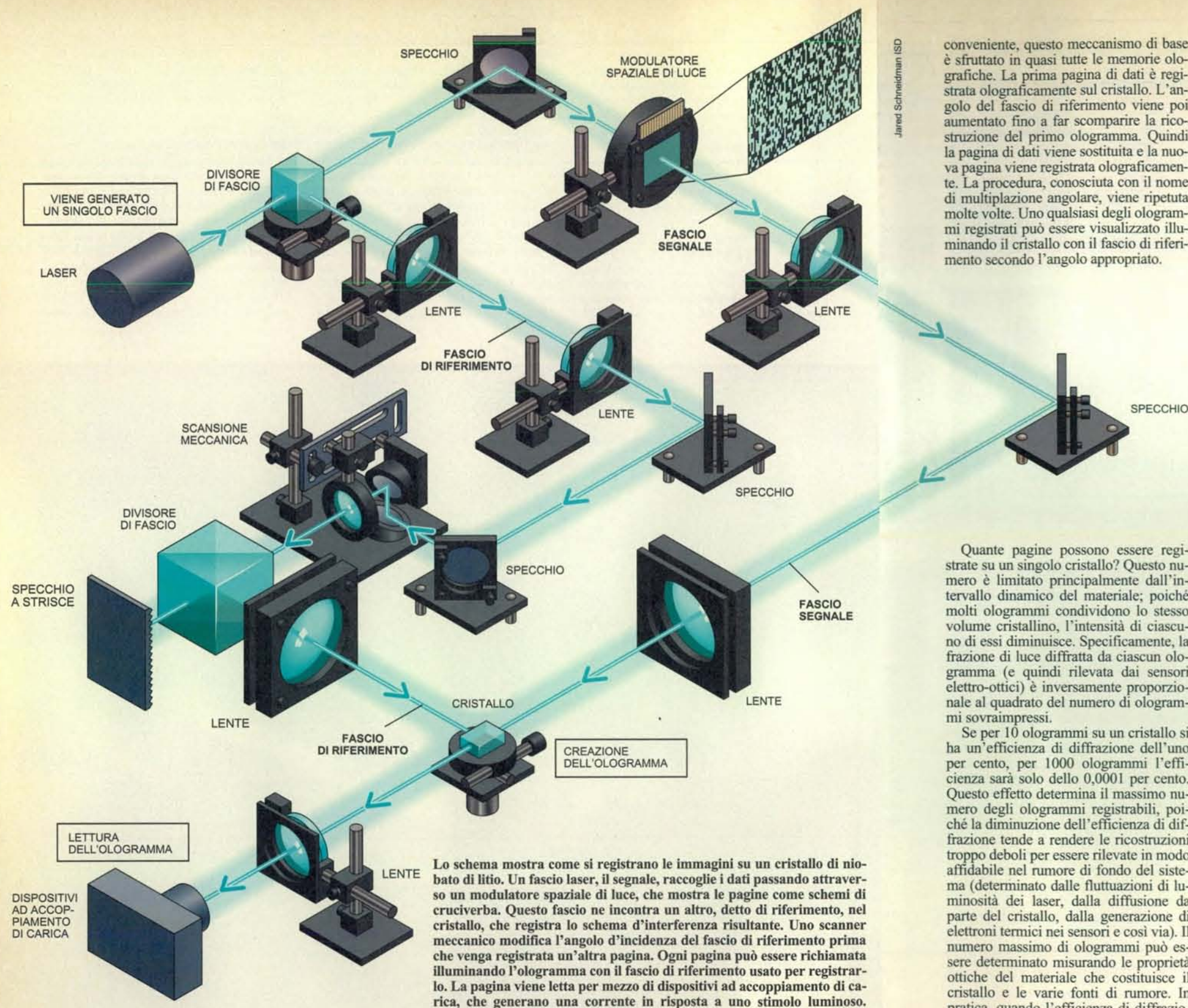
Come funzionano le memorie olografiche

Lo schema, noto anche come reticolo, si forma quando due fasci laser interferiscono reciprocamente su un materiale fotosensibile le cui proprietà vengono alterate dalla sovrapposizione dei fasci.

Prima che i bit d'informazione possano essere impressi in questo modo nel cristallo, devono essere rappresentati come uno schema di quadretti chiari e scuri su uno schermo a cristalli liquidi, una versione miniaturizzata degli schermi degli usuali calcolatori. Un fascio laser di colore blu-verde illumina questo schema «a cruciverba», o pagina, e viene focalizzato per mezzo di lenti per dare luogo al fascio segnale. Un ologramma della pagina di dati viene creato quando il fascio segnale incontra l'altro fascio, o fascio di riferimento, nel cristallo fotosensibile. Il fascio di riferimento, in questo caso, è collimato, il che significa che tutte le onde sono sincronizzate, con le creste e le valli che passano attraverso un determinato piano tutte insieme (per questa ragione, queste onde vengono chiamate onde piane). Il reticolo creato quando il segnale e il fascio di riferimento si incontrano è registrato nel cristallo come schema di rifrattività variabile.

Dopo essere stata registrata in questo modo, la pagina può essere ricostruita olograficamente illuminando un'altra volta il cristallo con il fascio di riferimento, disposto con lo stesso angolo d'incidenza secondo il quale era situato quando l'ologramma è stato creato. Nel passare attraverso il reticolo del cristallo, il fascio di riferimento è diffratto in modo da ricreare l'immagine della pagina originale e l'informazione che vi è con-

Charles O'Rear

Una memoria olografica immagazzina dati in un cristallo di niobato di litio non molto più grande di una zolletta di zucchero (*in basso al centro*). L'ologramma viene creato nel cristallo facendo interferire un fascio laser di riferimento, quello spesso e luminoso in questa illustrazione, con un fascio segnale, qui più debole e sottile, che contiene i dati.

Lo schema mostra come si registrano le immagini su un cristallo di niobato di litio. Un fascio laser, il segnale, raccoglie i dati passando attraverso un modulatore spaziale di luce, che mostra le pagine come schemi di cruciverba. Questo fascio ne incontra un altro, detto di riferimento, nel cristallo, che registra lo schema d'interferenza risultante. Uno scanner meccanico modifica l'angolo d'incidenza del fascio di riferimento prima che venga registrata un'altra pagina. Ogni pagina può essere richiamata illuminando l'ologramma con il fascio di riferimento usato per registrarlo. La pagina viene letta per mezzo di dispositivi ad accoppiamento di carica, che generano una corrente in risposta a uno stimolo luminoso.

tenuta. La pagina ricostruita viene poi proiettata su una schiera di sensori elettro-ottici che rilevano lo schema di punti chiari e scuri, leggendo così contemporaneamente tutte le informazioni contenute nella pagina. I dati possono quindi essere immagazzinati elettronicamente, ed è possibile accedervi o manipolarli mediante un comune calcolatore.

La caratteristica principale è l'accuratezza con cui il fascio di riferimento di *playback* deve riprodurre quello originale che ha registrato la pagina. La precisione dipende dallo spessore del cristallo: quanto maggiore è lo spessore, tanto maggiore è la cura con cui deve essere riposizionato il fascio di riferimento. Se il cristallo è spesso un centimetro e l'angolo di illuminazione è deviato di un millesimo di grado la ricostruzione sparisce completamente. Lungi dall'essere un inconveniente, questo meccanismo di base è sfruttato in quasi tutte le memorie olografiche. La prima pagina di dati è registrata olograficamente sul cristallo. L'angolo del fascio di riferimento viene poi aumentato fino a far scomparire la ricostruzione del primo ologramma. Quindi la pagina di dati viene sostituita e la nuova pagina viene registrata olograficamente. La procedura, conosciuta con il nome di multiplazione angolare, viene ripetuta molte volte. Uno qualsiasi degli ologrammi registrati può essere visualizzato illuminando il cristallo con il fascio di riferimento secondo l'angolo appropriato.

Quante pagine possono essere registrate su un singolo cristallo? Questo numero è limitato principalmente dall'intervallo dinamico del materiale; poiché molti ologrammi condividono lo stesso volume cristallino, l'intensità di ciascuno di essi diminuisce. Specificamente, la frazione di luce diffratta da ciascun ologramma (e quindi rilevata dai sensori elettro-ottici) è inversamente proporzionale al quadrato del numero di ologrammi sovraimpressi.

Se per 10 ologrammi su un cristallo si ha un'efficienza di diffrazione dell'uno per cento, per 1000 ologrammi l'efficienza sarà solo dello 0,0001 per cento. Questo effetto determina il massimo numero degli ologrammi registrabili, poiché la diminuzione dell'efficienza di diffrazione tende a rendere le ricostruzioni troppo deboli per essere rilevate in modo affidabile nel rumore di fondo del sistema (determinato dalle fluttuazioni di luminosità dei laser, dalla diffusione da parte del cristallo, dalla generazione di elettroni termici nei sensori e così via). Il numero massimo di ologrammi può essere determinato misurando le proprietà ottiche del materiale che costituisce il cristallo e le varie fonti di rumore. In pratica, quando l'efficienza di diffrazione è scesa a valori troppo bassi per ottenere una ricostruzione affidabile delle pagine, il tasso di dati erronei diventa inaccettabilmente elevato.

Segnali più intensi

Gran parte del lavoro necessario per sviluppare memorie olografiche deriva dall'applicazione di nuove tecniche per intensificare, a discapito del rumore di fondo, i segnali ottici che rappresentano pagine di dati. Con le migliori tecnologie è stato possibile rendere rivelabili in modo affidabile segnali sempre più deboli, e il perfezionamento dei metodi di registrazione olografica ha reso più intensi i segnali registrati, facendo aumentare il numero di pagine che possono essere impresse su un singolo cristallo.

I primi tentativi di immagazzinare molti ologrammi risalgono all'inizio degli anni settanta. Juan J. Amodei, William Phillips e David L. Staebler degli RCA Laboratories registrarono 500 ologrammi di onde piane in un cristallo di niobato di litio drogato con ferro. Robert A. Bartolini e altri, anch'essi degli RCA, registrarono 550 ologrammi di immagini ad alta risoluzione in un materiale polimerico fotosensibile, e il gruppo di Jean-Pierre Huignard alla Thomson-CSF di Orsay progettò una memoria con 256 locazioni, ciascuna capace di immagazzinare 10 ologrammi. Oltre a immagazzinare un numero relativamente elevato di ologrammi, il sistema di Huignard era eccellentemente progettato.

Per quanto alcuni di questi primi risultati fossero davvero sensazionali, nessuno di essi portò alla realizzazione di un sistema di utilità pratica. In quello stesso periodo, semiconduttori e memorie magnetiche progredivano assai più rapidamente, facendo apparire queste tecnologie più esotiche indegne di considerazione. Gradualmente, le memorie olografiche caddero nel dimenticatoio.

Il ritorno sulla ribalta ebbe inizio nel 1991, quando uno di noi (Mok), grazie ai finanziamenti della US Air Force e della Advanced Research Projects Agency del Department of Defense dimostrò di poter immagazzinare e recuperare ad alta fedeltà 500 immagini olografiche ad alta risoluzione di carri armati, *jeep* e altri veicoli militari in un cristallo di niobato di litio contenente tracce di ferro.

Ne seguirono diverse nuove teorie ed esperimenti. Nel 1992 immagazzinammo 1000 pagine di dati digitali in un cristallo di niobato di litio drogato con ferro del volume di un centimetro cubo. Ciascuna pagina registrata conteneva uno schema di 160 per 110 bit ottenuti dalla comune memoria elettronica di un personal computer. Ricopiammo quindi segmenti dei dati immagazzinati sulla memoria del computer, e non osservammo alcun errore. Questo esperimento dimostrò per la prima volta che l'immagazzinamento olografico può avere un'accuratezza sufficiente per i calcolatori.

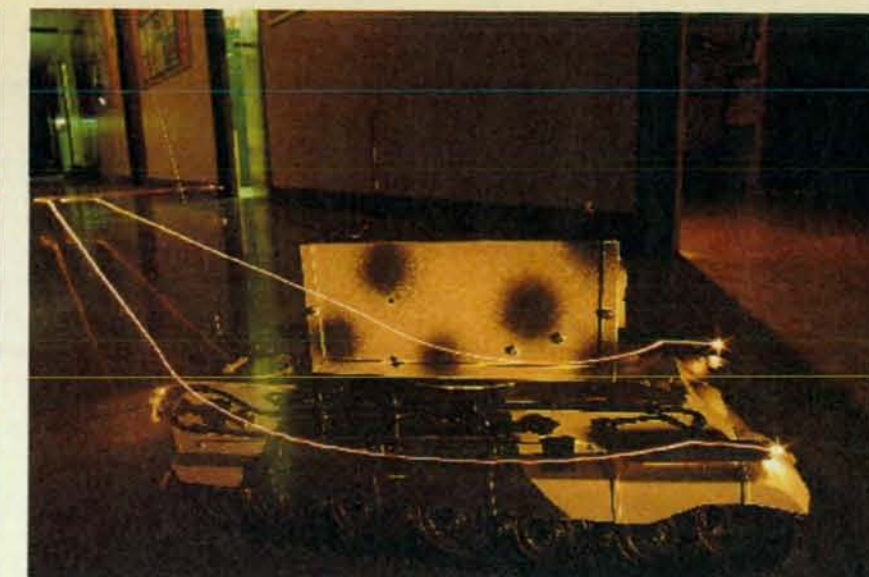
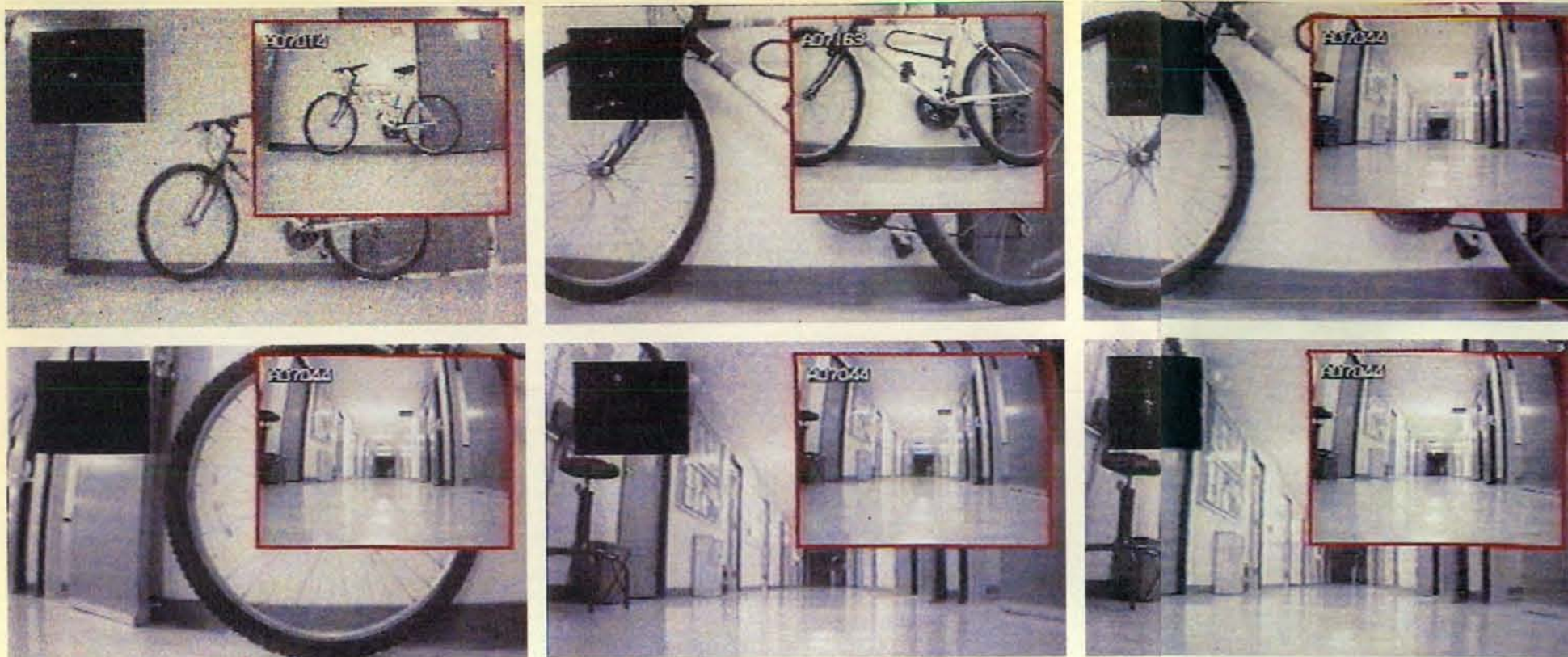
Un sistema simile fu usato per immagazzinare 10 000 pagine, il numero massimo in un singolo cristallo. Ciascuna di queste pagine misurava 320 bit per 220, cosicché il sistema poteva immagazzinare poco meno di 100 milioni di byte. Eseguimmo questo esperimento nel 1993 al California Institute of Technology in collaborazione con Geoffrey Burr.

La maggior parte dei 10 000 ologrammi immagazzinati era costituita da schemi binari casuali, simili ai dati che possono essere immagazzinati in un normale computer. Il tasso grezzo di errore fu di un bit su 100 000. Un tasso di questo genere è sufficiente a immagazzinare immagini, in particolare se non sono state compresse o manipolate per ridurre il numero di bit necessari per rappresentarle. Diversi ritratti e fotografie del logo del Caltech furono inclusi tra le pagine per dimostrare che in una memoria olografica immagini e dati possono facilmente essere combinati. L'informazione contenuta nei 10 000 ologrammi corrispondeva solo a un ottavo della capacità disponibile in un compact disc, ma si possono realizzare memorie olografiche di capacità molto più elevata immagazzinando ologrammi in locazioni multiple del cristallo. Per esempio, abbiamo realizzato un sistema in cui 10 000 pagine vengono immagazzinate in ciascuna di 16 locazioni, per un totale di 160 000 ologrammi.

Nel 1994 John F. Heanue, Matthew C. Bashaw e Lambertus Hesselink, della Stanford University, immagazzinarono immagini digitalizzate e compresse e video in una memoria olografica e ne richiamarono le informazioni senza significative perdite nella qualità delle immagini. Essi registrarono 308 pagine contenenti 1592 bit ciascuna in quattro locazioni separate del cristallo. Il gruppo di Stanford combinò diverse tecniche ottiche ed elettroniche per mantenere sotto controllo il tasso di errore. Per esempio, aggiunsero qualche bit a ogni stringa di otto bit per correggere un eventuale errore contenuto in qualche bit del gruppo. Questo codice per la correzione degli errori ha corretto il tasso di errore da circa un bit su 10 000 a un bit su un milione.

Un altro importante vantaggio potenziale dell'immagazzinamento olografico è il rapido accesso casuale con mezzi non meccanici. Per esempio, nei solidi si possono usare onde acustiche ad alta frequenza per deflettere un fascio di riferimento allo scopo di selezionare e leggere una pagina di dati in tempi dell'ordine delle decine di microsecondi, anziché le decine di millisecondi tipiche dei movimenti delle testine meccaniche dei dischi ottici e magnetici attuali. Al Centro di ricerca della Rockwell di Thousand Oaks, in California, John H. Hong e Ian McMichael hanno progettato e realizzato un sistema compatto in grado di immagazzinare 1000 ologrammi in ciascuna di 20 diverse locazioni. Si può accedere a una qualsiasi pagina in meno di 40 microsecondi e i dati possono essere recuperati senza errori.

Polimeri promettenti

Come nel caso dei primi esperimenti degli anni settanta, per queste recenti dimostrazioni si impiegano cristalli di niobato di litio drogati con tracce di ferro.

California Institute of Technology; Eric Sander (veicolo)

Un veicolo guidato da ologrammi ha navigato autonomamente intorno al laboratorio degli autori. Ognuna delle fotografie composite di questa sequenza mostra l'immagine fornita da una telecamera montata sul veicolo (*immagine principale*), insieme con un'altra immagine (*nel riquadro*) che veniva trasmessa all'auto da una memoria olografica. Il veicolo cambiava orientamento finché l'immagine della telecamera non coincideva con una di quelle registrate nella memoria. I punti luminosi nell'altro piccolo riquadro indicano il grado di sincronizzazione delle due immagini. In questa serie, il veicolo inizialmente ha riconosciuto una bicicletta e vi si è avvicinato, quindi è stato instradato dall'immagine di ciò che avrebbe visto eseguendo una svolta a sinistra.

Quando vengono illuminate da uno schema ottico - come un ologramma creato dall'interferenza di due fasci laser - particelle cariche migrano nel cristallo generando un campo elettrico la cui modulazione corrisponde strettamente allo schema ottico. Il modo in cui il cristallo diffrange la luce dipende da questo campo elettrico: quando il cristallo viene nuovamente illuminato secondo il corretto angolo di incidenza, la luce viene diffratta in modo da ricostruire l'ologramma originario. Questo fenomeno è noto come effetto fotorifrattivo (si veda l'articolo *Fotorifrazione laser* di David M. Pepper, Jack Feinberg e Nicolai V. Kukhtarev in «Le Scienze» n. 268, dicembre 1990).

Nel 1994 per la prima volta divenne commercialmente disponibile un diverso tipo di materiale olografico. Sviluppato alla Du Pont, questo fotopolimero quando è esposto alla luce subisce variazioni chimiche, anziché fotorifrattive. Le cariche elettriche non vengono eccitate, e le variazioni fotochimiche sono permanenti, ovvero l'informazione non può essere cancellata o riscritta. Il mezzo è perciò adatto come memoria per una scrittura e poi per sola lettura (*Read Only Memory* o ROM).

Il materiale ha, comunque, un'efficienza di diffrazione 2500 volte più grande di un cristallo di niobato di litio dello stesso spessore. Uno di noi (Psaltis), in collaborazione con Allen Pu del Caltech e Kevin Curtis degli AT&T Bell Laboratories, ha organizzato un esperimento in cui sono state immagazzinate 1000 pagine di schemi di bit in una pellicola polimerica dello spessore di 100 micrometri. Ne abbiamo recuperato i dati senza rilevare alcun errore.

In anni recenti, alcuni ricercatori dell'IBM e dell'Università dell'Arizona hanno iniziato esperimenti con pellicole polimeriche che, come i cristalli di niobato di litio, manifestano effetto fotorifrattivo. Per quanto promettenti siano gli esperimenti con i materiali olografici polimerici, è troppo presto per escludere il niobato di litio, che recentemente ha a sua volta mostrato una grande versatilità. Per esempio, da qualche tempo sono divenuti disponibili cristalli di niobato di litio drogati con tracce di cerio e ferro - sensibili alla luce rossa anziché a quella verde. Questi cristalli aprono la strada a materiali che possono essere impressi mediante sottili ed economici laser a semiconduttore, al posto dei molto più costosi laser verdi o blu-verdi.

Qualche cosa presa a prestito, qualche cosa nuova

I cristalli di niobato di litio drogati con ferro utilizzati nelle recenti dimostrazioni non sono il solo aspetto residuo dei primi esperimenti. Anche i laser ad argon che si usano normalmente oggi sono gli stessi di allora. E la multiplazione angolare cui ci si affidava in passato è la stessa di oggi. Ma allora, quali cambiamenti hanno ridato vitalità all'immagazzinamento di dati olografico?

Il progresso più significativo è costituito dall'emergere di un'industria optoelettronica matura, che ha prodotto i dispositivi economici, compatti ed efficienti necessari per costruire memorie olografiche su vasta scala e per interfacciarle con i calcolatori. Per esempio, sottili laser a semiconduttore che emettono luce rossa, originariamente sviluppati per le comunicazioni in fibra ottica, possono essere utilizzati come sorgenti luminose sia per il cristallo a niobato di litio drogato con cerio e ferro sia per i fotopolimeri della Du Pont. Grandi schiere di rivelatori sviluppati per le telecamere televisive, che riprendono un'immagine ottica e la convertono in un segnale elettronico, leggono il segnale in uscita dalla memoria. Schermi a cristalli liquidi originariamente progettati per i videoproiettori vengono impiegati come dispositivi d'ingresso e creano gli schemi chiaro-scuri che rappresentano le pagine di dati.

Questi progressi tecnologici hanno reso possibili gli esperimenti recenti che, a loro volta, hanno indirizzato gli studi sulla fisica delle memorie olografiche. Per esempio, un problema di vecchia data delle memorie olografiche è il rumore da interferenza, la parziale, spontanea e indesiderata lettura dei dati immagazzinati. In pratica l'interferenza provoca il richiamo di deboli immagini-fantasma di tutte le pagine allorché si desidera accedere a una sola di esse. Il rumore da interferenza e le sue fonti ora non costituiscono più un mistero, il che permette di calcolare l'effetto e di riequilibrarlo in qualsiasi condizione di registrazione manipolando parametri come l'angolo tra il segnale e il fascio di riferimento, l'angolo tra i fasci di riferimento in una registrazione multipla e le proprietà geometriche delle pagine di dati.

Un altro sottoprodotto del lavoro teorico è stato lo sviluppo di nuovi metodi di multiplazione e il raffinamento di quelli esistenti. Queste tecniche possono sostituire la multiplazione angolare o fungere da complemento, offrendo ai progettisti di sistemi più opzioni. Secondo una delle alternative, perseguita indipendentemente al Caltech e all'Università della Pennsylvania, pagine successive vengono registrate con fasci di riferimento di lunghezza d'onda diversa. Fasci di riferimento codificati con uno schema diverso per ogni pagina, invece, sono stati sperimentati con successo all'Università della California a San Diego e, in modo indipendente, all'Istituto di ottica di Orsay.

Aumentare il volume

Migliori tecniche di multiplazione sono certamente le benvenute, ma perché le memorie olografiche diventino veramente concorrenziali nei confronti dei compact disc è necessario un significativo aumento della capacità. È dimostrato che oggi le memorie olografiche sono decisamente più veloci dei sistemi a compact disc, ma la sola velocità raramente è sufficiente affinché una nuova tecnologia ne soppianti una già consolidata. Generalmente è necessario un altro vantaggio fondamentale, come per esempio una grande capacità.

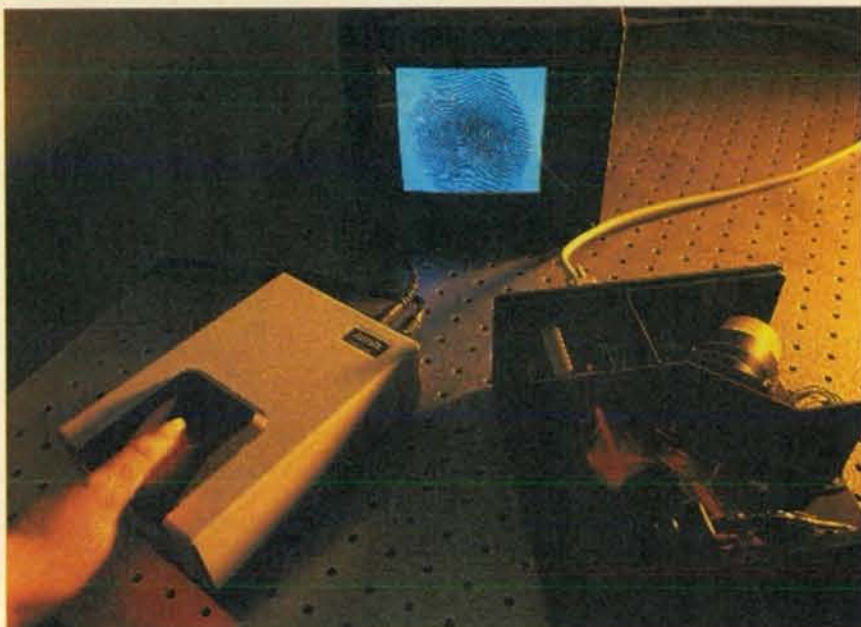
Un modo per aumentare la capacità di immagazzinamento in una memoria olografica consisterebbe nel rivestire una superficie con cristalli «a zolletta di zucchero», secondo una tecnica detta multiplazione spaziale. Come è facilmente intuibile, la capacità di un sistema simile è proporzionale al numero di cubi. I dati vengono immagazzinati in ciascuno dei cubi secondo lo schema tradizionale, quello della multiplazione angolare.

La sfida di questo tipo di sistema è l'assemblaggio ottico, che deve essere in grado di raggiungere ciascuno dei cubi singolarmente. Un assemblaggio di questo genere è il disco tridimensionale, che presenta molte somiglianze con il CD. Il materiale da registrazione a forma di disco viene collocato su una piattaforma rotante su cui è montato un dispositivo di lettura e scrittura costituito da un laser. La rotazione del disco e la scansione radiale della testina consentono di illuminare qualsiasi punto del disco. Psaltis propose quest'idea nel 1992 e all'inizio di quest'anno, al Caltech, Pu costruì un sistema basato su questo principio.

Come in un qualsiasi mezzo olografico, i dati vengono immagazzinati nel volume dello strato di registrazione del disco tridimensionale. La testina è dotata di una schiera di sensori per leggere un'intera pagina di dati e di un deflettore di fascio per la multiplazione angolare. Nella testina potrebbe anche essere incorporato un modulatore spaziale di luce, che imprime la pagina di dati sul fascio segnale (come gli schermi a cristalli liquidi usati nelle attuali dimostrazioni).

Anche se un disco tridimensionale immagazzina informazioni in tre dimensioni, il numero di bit che potrebbero teoricamente essere registrati per micrometro quadrato di superficie del disco può essere calcolato allo scopo di paragonare questa densità d'informazione a quella di un CD tradizionale. Un simile paragone è sensato anche perché un disco tridimensionale può essere sottile quanto un CD. Ne risulta che per spessori inferiori a due millimetri la densità superficiale del disco olografico è approssimativamente proporzionale allo spessore del mezzo di registrazione. Nella sua dimostrazione al Caltech, Pu ha raggiunto una densità superficiale di 10 bit per micrometro quadrato in una pellicola polimerica dello spessore di 100 micrometri (il massimo disponibile per questo particolare materiale). Questa densità è circa dieci volte superiore a quella di un CD tradizionale.

È possibile incrementare ancora la densità superficiale semplicemente aumentando lo spessore dello strato olografico. Densità di 100 bit per micrometro quadrato sarebbero possibili con un materiale di un millimetro di spessore. Un disco tridimensionale di questo tipo sarebbe pressoché identico, per dimensioni e peso, a un CD, ma potrebbe immagazzinare 100 volte più informazioni.

Una delle società che effettuano ricerca in questo campo è la Holoplex di Pasadena. Questa società ha costruito un sistema di memoria ad alta velocità in gra-

Eric Sander

Una serratura olografica contiene fino a 1000 impronte digitali. Per accedere a una stanza, un utente appoggia un dito su una lastra di vetro. L'impronta deve coincidere con una di quelle contenute nella memoria, registrate in forma olografica. La velocità di queste memorie rende minimo il tempo di ricerca. Questo dispositivo, sviluppato dalla società giapponese Hamamatsu, impiega la memoria olografica qui mostrata, prodotta dalla Holoplex di Pasadena, in California, una società fondata dagli autori.

do di immagazzinare fino a 1000 impronte digitali, da utilizzare come serratura selettiva per limitare l'accesso a particolari edifici o stanze. La capacità di questo sistema è approssimativamente pari solo alla metà di un CD, ma il suo intero contenuto può essere letto in un secondo. La Holoplex sta preparando un altro prodotto, che sarebbe in grado di immagazzinare fino a mille miliardi di bit, cioè quasi 200 volte la capacità di un CD.

Memoria per associazione

Prima che questo «super CD» divenga una realtà commerciale, le memorie olografiche potranno essere impiegate in sistemi specializzati ad alta velocità. Alcuni di questi potrebbero sfruttare la natura associativa dell'immagazzinamento olografico, una caratteristica esposta per la prima volta nel 1969 da Dennis Gabor, che nel 1971 fu insignito del Nobel per la fisica per l'invenzione dell'olografia.

Dato un ologramma, uno qualsiasi dei due fasci luminosi che lo hanno creato per interferenza può essere utilizzato per ricostruire l'altro. Ciò significa che in una memoria olografica è possibile non solo orientare un fascio di riferimento nel cristallo secondo un certo angolo di incidenza per selezionare una singola pagina olografica, ma anche compiere l'operazione inversa. Illuminando un cristallo con una delle immagini in esso immagazzinate si ottiene un'approssimazione del fascio di riferimento a essa associato, riprodotto sotto forma di onda piana che fuoriesce dal cristallo secondo un determinato angolo.

Per mezzo di una lente, è possibile focalizzare questa onda su una piccola regione la cui posizione laterale è determinata dall'angolo e perciò determina l'identità della pagina in ingresso. Se la pagina viene illuminata con un ologramma che non fa parte degli schemi registrati, il risultato sarà costituito da fasci di riferimento multipli, ovvero da diversi piccoli punti di focalizzazione dell'onda piana. La luminosità di ciascun punto è proporzionale al grado di somiglianza dell'immagine in ingresso con ciascuno degli schemi registrati. In altre parole, la schiera di punti luminosi rappresenta un codice dell'immagine in ingresso, determinato dalla somiglianza dell'immagine con il database delle immagini immagazzinate.

All'inizio del 1995, al Caltech, Pu, Robert Denkewalter e Psaltis usarono in questo modo una memoria olografica per guidare una piccola auto attraverso i corridoi e i laboratori dell'edificio che ospita il Dipartimento di ingegneria elettrica. Immagazzinammo immagini selezionate dei corridoi e delle stanze in una memoria olografica connessa a un calcolatore digitale che si trovava in un laboratorio e le comunicammo all'auto via radio. Una telecamera montata sull'auto forniva l'ingresso visivo. Via via che l'auto compiva le sue manovre, il calcolatore paragonava le immagini della telecamera con quelle contenute nella memoria olografica (*si veda l'illustrazione alle pagine 42 e 43*). Quando riconosceva un'immagine «familiare» il calcolatore guidava l'auto lungo uno dei diversi cammini prescritti, ciascuno dei quali era definito da una sequenza di immagini richiamate dalla memoria. Erano state registrate circa 1000 immagini, ma verificammo che per navigare attraverso diverse stanze dell'edificio ne furono necessarie soltanto 53.

Ora stiamo progettando un veicolo diverso, che speriamo di equipaggiare con una memoria abbastanza grande da viaggiare autonomamente in lungo e in largo per il *campus*. Anche con una capacità così vasta, il parallelismo della memoria olografica permetterebbe di richiamare l'informazione registrata con una rapidità sufficiente affinché il veicolo segua le strade ed eviti gli ostacoli. La navigazione, perciò, potrebbe essere una delle applicazioni specializzate in grado di generare quell'impennata necessaria a portare la tecnologia nell'uso comune.

Questo progresso potrebbe essere lontano ancora diversi anni, ma con l'aumentare della necessità di immagazzinare grandi quantità di dati aumenterà anche la convenienza di registrare le informazioni in tre dimensioni anziché in due.

DEMETRI PSALTIS e FAI MOK hanno iniziato a collaborare al California Institute of Technology. Psaltis è professore di ingegneria elettrica e responsabile del Dipartimento di calcolo e sistemi neurali del Caltech. Nel 1989 è stato insignito della International Commission for Optics Prize. Mok è presidente della Holoplex, fondata con Psaltis nel 1993. Si è laureato nel 1989 con una tesi sull'elaborazione di segnali binari.

PSALTIS DEMETRI, *Parallel Optical Memories* in «Byte», 17, n. 9, settembre 1992.

MOK FAI H., *Angle-Multiplexed Storage of 5000 Holograms in Lithium Niobate* in «Optics Letters», 18, n. 11, giugno 1993.

SIDNEY LI HSIN-YU e PSALTIS DEMETRI, *Three-Dimensional Holographic Disks* in «Applied Optics», 33, n. 17, 10 giugno 1994.

SINCERBOX GLENN T. (a cura), *Selected Papers on Holographic Storage*, volume MS95, SPIE Optical Engineering Press, 1994.

HONG JOHN H., McMICHAEL IAN, CHANG TALLIS Y., CHRISTIAN WILLIAM e PAEK EUNG GI, *Volume Holographic Memory Systems: Techniques and Architectures* in «Optical Engineering», 34, n. 8, agosto 1995.

Il clima caotico

Le temperature globali possono cambiare in modo sostanziale anche nell'arco di uno o due decenni; potrebbe essere imminente un'altra brusca variazione?

di Wallace S. Broecker

Gli ultimi 10 000 anni sono stati anomali nella storia del nostro pianeta. Questo periodo, durante il quale si è sviluppata la civiltà, è stato contrassegnato da un clima più costante e stabile rispetto a ogni altro periodo di durata analoga negli ultimi 100 000 anni. Le carote di ghiaccio prelevate nella coltre glaciale della Groenlandia testimoniano un susseguirsi di periodi freddi e caldi, ognuno della durata di 1000 anni o più, che facevano abbassare o innalzare la temperatura media dell'Europa settentrionale persino di 10 gradi centigradi in un decennio soltanto. I segni di questi repentini cambiamenti possono essere letti nelle fluttuazioni quantitative del pulviscolo atmosferico, del contenuto di metano e delle precipitazioni testimoniate dagli strati annuali di ghiaccio.

L'ultimo periodo freddo della durata di un millennio, il Dryas recente, terminò circa 11 000 anni fa. Le sue tracce possono essere reperite nei sedimenti marini dell'Atlantico settentrionale, nelle morene glaciali scandinave e islandesi e nei laghi e nelle paludi dell'Europa settentrionale e delle regioni canadesi prossime all'oceano. Anche il New England si raffreddò considerevolmente.

È sempre più chiaro che il Dryas recente ebbe effetti di portata globale. Il riscaldamento postglaciale del plateau polare antartico ebbe un arresto della durata di un millennio; al tempo stesso i ghiacciai di montagna della Nuova Zelanda avanzarono notevolmente, e le proporzioni di specie differenti nella popolazione planctonica del Mar Cinese meridionale cambiarono in modo netto. Il contenuto atmosferico di metano precipitò del 30 per cento. Solo la documentazione fornita dai pollini in alcune zone degli attuali Stati Uniti non mostra tracce di questo periodo.

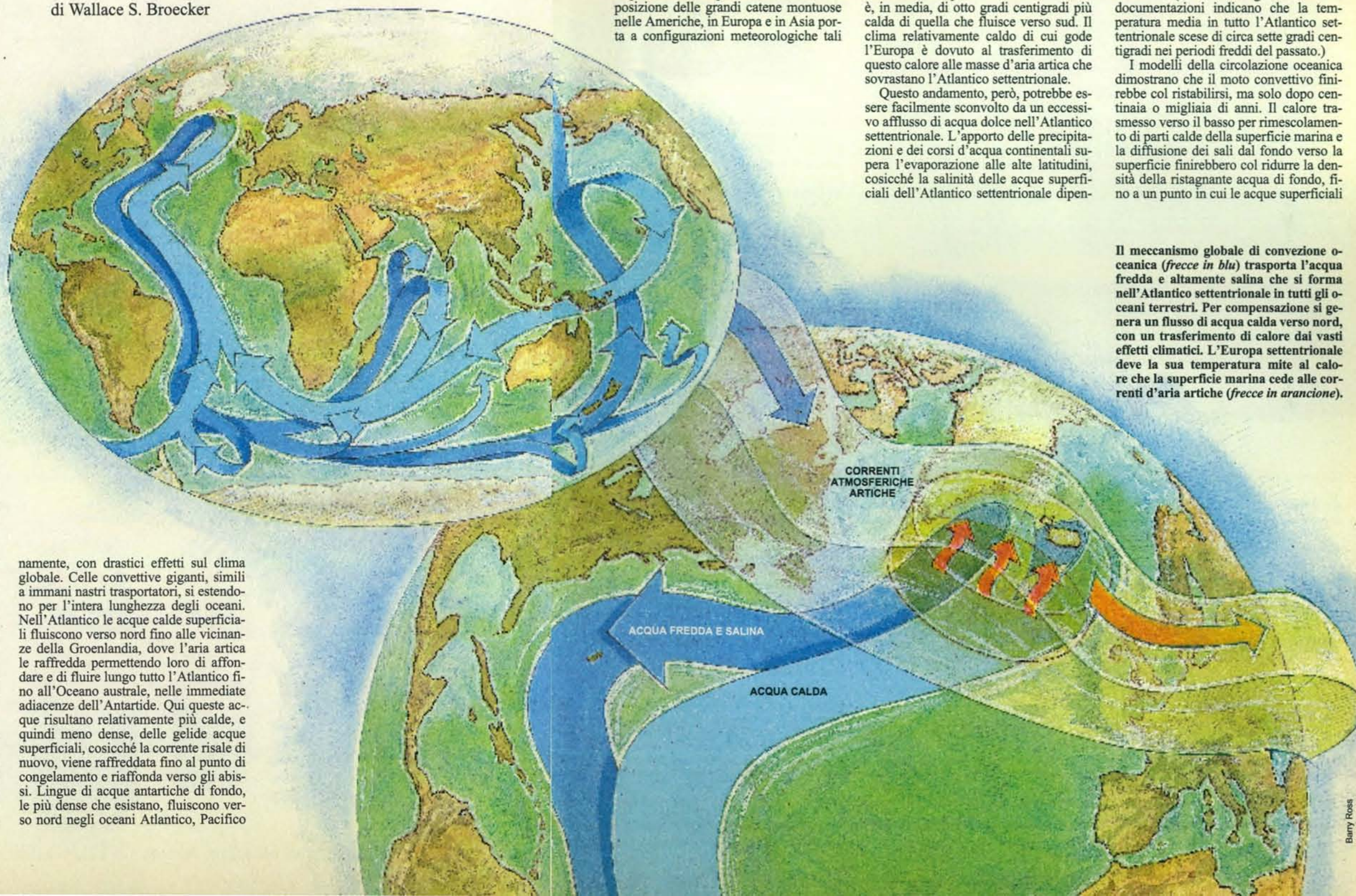
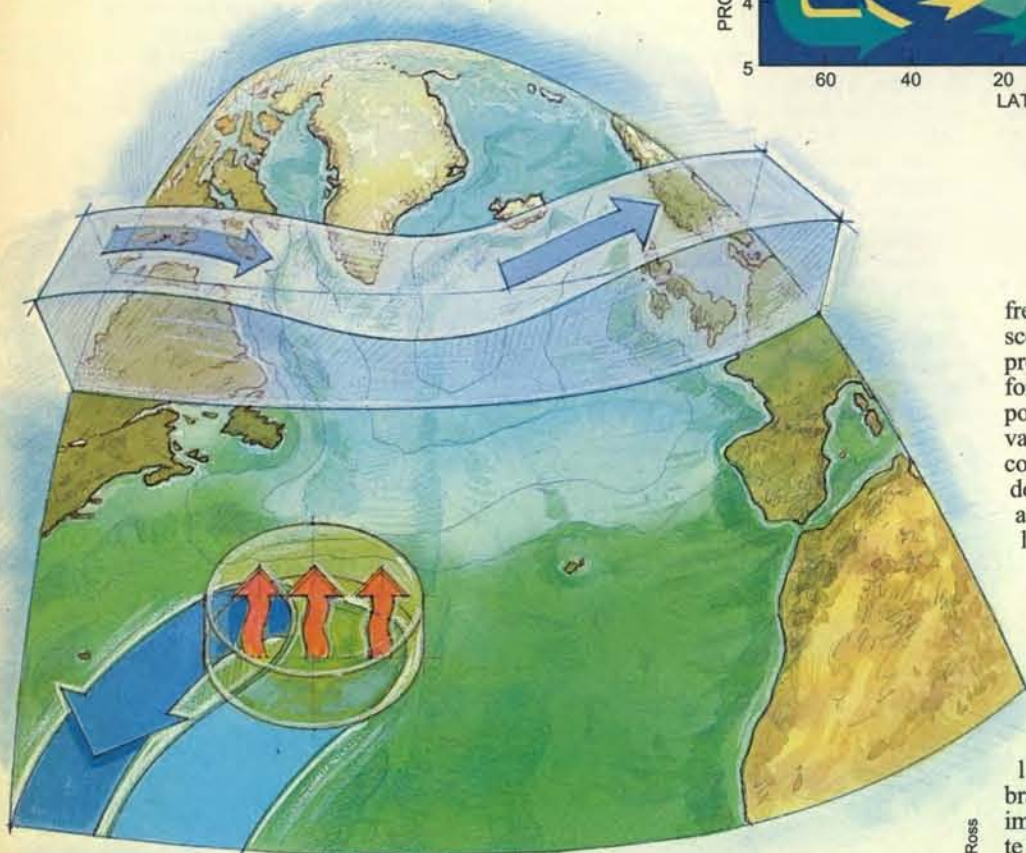
Che cosa c'è dietro a questa storia turbolenta? Potrebbe mai ripetersi una cosa del genere? Nessuno sa per certo che cosa sia accaduto, ma esistono alcuni chiari indizi. Diversi modelli indicano che la circolazione del calore e della salinità negli oceani può cambiare repentinamente, con drastici effetti sul clima globale. Celle convettive giganti, simili a immani nastri trasportatori, si estendono per l'intera lunghezza degli oceani. Nell'Atlantico le acque calde superficiali fluiscono verso nord fino alle vicinanze della Groenlandia, dove l'aria artica le raffredda permettendo loro di affondare e di fluire lungo tutto l'Atlantico fino all'Oceano australe, nelle immediate adiacenze dell'Antartide. Qui queste acque risultano relativamente più calde, e quindi meno dense, delle gelide acque superficiali, cosicché la corrente risale di nuovo, viene raffreddata fino al punto di congelamento e riaffonda verso gli abissi. Lingue di acque antartiche di fondo, le più dense che esistano, fluiscono verso nord negli oceani Atlantico, Pacifico e Indiano, e alla fine risalgono di nuovo per chiudere il ciclo. Negli oceani Pacifico e Indiano, il flusso verso nord delle acque di fondo è compensato da un movimento verso sud delle acque superficiali. Nell'Atlantico questo controflusso verso nord viene rapidamente trascinato nella corrente molto più forte del «nastro trasportatore», diretta verso sud.

Queste cosiddette acque profonde si formano nell'Atlantico settentrionale - ma non nel Pacifico - perché le acque superficiali dell'Atlantico hanno un contenuto percentuale di sali disciolti molto più elevato di quelle del Pacifico. La posizione delle grandi catene montuose nelle Americhe, in Europa e in Asia porta a configurazioni meteorologiche tali che l'aria che lascia il bacino dell'Atlantico è più umida di quella che vi entra; la perdita netta di acqua superficiale che ne risulta conduce a un eccesso di salinità. Il sale rende più densi gli strati superiori dell'oceano; questi allora affondano nell'Atlantico settentrionale e danno inizio a un andamento della circolazione globale che tende a ridistribuire il sale in tutti gli oceani del pianeta.

La circolazione dell'Atlantico, che ha una portata pari a circa 100 volte quella del Rio delle Amazzoni, provoca il trasporto verso nord di un'enorme quantità di calore. L'acqua che scorre verso nord è, in media, di otto gradi centigradi più calda di quella che fluisce verso sud. Il clima relativamente caldo di cui gode l'Europa è dovuto al trasferimento di questo calore alle masse d'aria artica che sovrastano l'Atlantico settentrionale.

Questo andamento, però, potrebbe essere facilmente sconvolto da un eccessivo afflusso di acqua dolce nell'Atlantico settentrionale. L'apporto delle precipitazioni e dei corsi d'acqua continentali supera l'evaporazione alle alte latitudini, cosicché la salinità delle acque superficiali dell'Atlantico settentrionale dipende dalla rapidità con cui il nastro trasportatore porta via l'acqua dolce in eccesso. Un qualunque intoppo del sistema di trasporto tenderebbe a perpetuarsi e, se mai il nastro trasportatore dovesse arrestarsi, le temperature invernali nell'Atlantico settentrionale e nelle zone circostanti scenderebbero bruscamente di almeno cinque gradi centigradi. A Dublino si instaurerebbe così il clima delle Isole Svalbard, che si trovano 1000 chilometri a nord del circolo polare artico. Inoltre questo mutamento climatico avverrebbe probabilmente in meno di un decennio. (Le carote di ghiaccio e altre documentazioni indicano che la temperatura media in tutto l'Atlantico settentrionale scese di circa sette gradi centigradi nei periodi freddi del passato.)

I modelli della circolazione oceanica dimostrano che il moto convettivo finirebbe col ristabilirsi, ma solo dopo centinaia o migliaia di anni. Il calore trasmesso verso il basso per rimescolamento di parti calde della superficie marina e la diffusione dei sali dal fondo verso la superficie finirebbero col ridurre la densità della ristagnante acqua di fondo, fino a un punto in cui le acque superficiali

Il meccanismo globale di convezione oceanica (*frecce in blu*) trasporta l'acqua fredda e altamente salina che si forma nell'Atlantico settentrionale in tutti gli oceani terrestri. Per compensazione si genera un flusso di acqua calda verso nord, con un trasferimento di calore dai vasti effetti climatici. L'Europa settentrionale deve la sua temperatura mite al calore che la superficie marina cede alle correnti d'aria artiche (*frecce in arancione*).

Il meccanismo di convezione proposto da Stefan Rahmstorf dell'Università di Kiel (*qui sotto*) agirebbe alla latitudine dell'Europa meridionale e pertanto non trasferirebbe con efficienza calore ai venti nord-atlantici. Le temperature in Europa durante le epoche glaciali, quando questo meccanismo era in azione, erano in media di 10 gradi centigradi più basse che ai nostri giorni. Questo tipo di convezione era caratterizzato da una circolazione superficiale (*a destra*).

dell'una o dell'altra regione polare potrebbero di nuovo penetrare in profondità e ristabilire la circolazione del calore e dei sali. L'andamento di questa rinnovata circolazione non sarebbe necessariamente lo stesso in vigore prima dell'arresto, ma dipenderebbe dalle modalità dell'afflusso di acqua dolce al mare in ognuna delle due regioni polari.

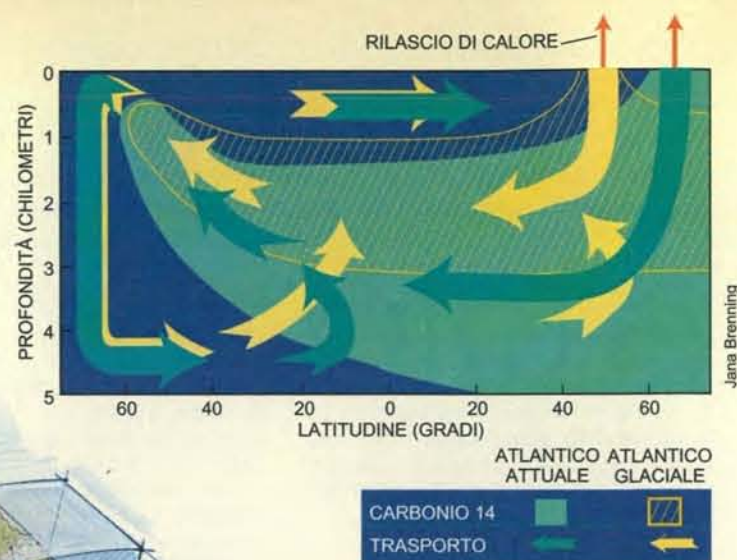
Più recentemente, modelli di circolazione realizzati da Stefan Rahmstorf dell'Università di Kiel hanno indicato che l'arresto del sistema di trasporto primario potrebbe essere seguito dalla formazione di uno schema alternativo di circolazione operante a profondità minori, nel quale le acque profonde si formerebbero a nord delle Bermude anziché in prossimità della Groenlandia. Questo spostamento renderebbe di gran lunga meno efficiente il riscaldamento dell'Europa settentrionale. Il nastro trasportatore superficiale del modello di Rahmstorf può essere messo fuori uso da un afflusso di acqua dolce, proprio come accade per quello primario, ma il modello prevede una riattivazione spontanea dopo pochi decenni. Non è ancora chiaro, comunque, in che modo la circolazione oceanica potrebbe ritornare dal sistema di trasporto superficiale a quello più profondo che opera attualmente.

Due proprietà del modello di Rahmstorf meritano attenzione. In primo luogo, l'andamento superficiale della circolazione concorda con la distribuzione tipica di epoca glaciale del cadmio e degli isotopi del carbonio contenuti nei gusci dei foraminiferi bentonici. Oggi le acque del nastro trasportatore dell'Atlantico settentrionale sono povere di cadmio e ricche di carbonio 13, mentre le acque profonde del resto degli oceani sono ricche di cadmio e povere di carbonio 13.

Questo contrasto è dovuto al fatto che la respirazione degli organismi acquatici riduce il carbonio 13 e aumenta la concentrazione del cadmio (nonché di altri elementi la cui storia non rimane documentata nei gusci). Durante gli episodi freddi, i livelli di cadmio ebbero un brusco decremento nelle acque di media profondità dell'Atlantico e aumentarono fortemente nelle acque di fondo; il rapporto carbonio 13/carbonio 12 mostrava l'andamento opposto, coerentemente con la conclusione di Rahmstorf secondo cui il nastro trasportatore funzionava a un livello più superficiale, escludendo le acque profonde.

In secondo luogo, il nastro trasportatore alternativo consente ancora il trasporto in profondità del radiocarbonio. Se questo trasferimento fosse cessato, i metodi di datazione radiochimica basati sul decadimento del carbonio 14 mostrerebbero enormi distorsioni; viceversa, l'orologio al radiocarbonio è stato calibrato con altri mezzi ed è stato trovato imperfetto, ma ancora fondamentalmente valido.

Solo un quarto circa del carbonio mondiale si trova oggi nella parte superiore degli oceani e nell'atmosfera; il rimanente è nelle zone abissali degli oceani. La ridistribuzione del carbonio 14 radioattivo, che si forma nell'atmosfera per azione dei raggi cosmici, dipende dalla velocità della circolazione oceanica. Negli oceani attuali, la maggior parte del radiocarbonio che raggiunge le acque profonde lo fa tramite la circolazione del nastro trasportatore dell'Atlantico. Mentre attraversano l'Atlantico da sud a nord, le acque più superficiali del nastro trasportatore si caricano di radiocarbonio assorbendolo dall'aria; successivamente la circolazione trascina il radiocarbonio in profondità. Sebbene l'acqua profonda riaffiori brevemente nella parte di oceano che circonda il continente antartico, in questa zona è ben poco il radiocarbonio che entra in soluzione.

Questo stato di cose implica che anche un semplice rallentamento del nastro trasportatore avrebbe effetti significativi sull'abbondanza del carbonio 14 sia nell'atmosfera sia nell'oceano. Il rapporto tra il carbonio 14 e l'isotopo stabile carbonio 12 nelle profondità dell'oceano è oggi circa del 12 per cento inferiore rispetto alla media delle acque superficiali e dell'atmosfera a causa del decadimento radioattivo che ha luogo mentre l'acqua profonda circola. Nel frattempo i raggi cosmici ripristinano l'1 per cento del quantitativo globale di radiocarbonio ogni 82 anni. Di conseguenza, se gli scambi tra gli strati superficiali e quelli profondi dell'oceano dovessero cessare, il rapporto carbonio 14/carbonio 12 alla superficie oceanica e nell'atmosfera aumenterebbe del 5 per cento ogni secolo, dato che il carbonio 14 prodotto dai raggi cosmici non verrebbe trascinato in profondità. Dopo un millennio di isolamento, il rapporto dei due isotopi del carbonio nell'atmosfera salirebbe di un terzo rispetto al suo valore originario.

Un simile evento perturberebbe gravemente le datazioni con il radiocarbonio. I paleontologi determinano l'età dei materiali organici misurando il loro contenuto residuo di carbonio 14. La quantità dell'isotopo incorporata nella struttura di una pianta mentre essa vive dipende dalla proporzione di radiocarbonio nell'atmosfera (o nell'oceano) di quella data epoca; a parità di questo valore, meno carbonio 14 è presente nei resti, più antico deve essere il campione. Le piante cresciute durante un arresto del nastro trasportatore avrebbero incorporato un quantitativo maggiore di radiocarbonio e quindi apparirebbero oggi più giovani di quanto realmente non siano. Quando poi il sistema di trasporto si rimise in movimento e portò il carbonio 14 a livelli più vicini agli attuali, l'anomalia scomparve. Le piante dei periodi freddi sembrerebbero allora - secondo la datazione al radiocarbonio - contemporanee a esemplari di clima caldo vissuti 1000 anni più tardi.

Sebbene il quantitativo di carbonio 14 nell'atmosfera sia variato di molto nel tempo, le sequenze di date ottenute con il radiocarbonio da sedimenti marini accumulatisi plausibilmente a una velocità quasi uniforme dimostrano chiaramente che negli ultimi 20 000 anni non vi sono stati mutamenti improvvisi. Anzi, misurazioni su coralli le cui età assolute erano state determinate con il metodo uranio-torio implicano che alla fine dell'ultima epoca glaciale, quando il sistema convettivo dovrebbe essersi messo di nuovo in moto sottraendo carbonio 14 all'atmosfera, il contenuto atmosferico di radiocarbonio sia aumentato.

Questa documentazione sembra dirci che ogni arresto del sistema convettivo dovrebbe essere stato di breve durata - un secolo o meno - e che a tali arresti avrebbero fatto da contraltare intervalli di rapido mescolamento. Il Dryas recente fu in particolare un periodo in cui la circolazione complessiva degli oceani si intensificò anziché diminuire, come ci si dovrebbe attendere se il periodo freddo fosse stato causato da un completo arresto del sistema di convezione dell'Atlantico. Se questo sistema convettivo si fermò, fu però sostituito da qualche altro meccanismo di trasporto del radiocarbonio nelle profondità dell'oceano.

Ammettendo che siano stati cambiamenti del meccanismo di convezione a causare i bruschi mutamenti osservati nelle carote di ghiaccio della Groenlandia e in altre testimonianze paleoclimatiche, da dove potrebbe venire l'eccesso di acqua dolce necessario ad arrestare il trasporto d'acqua in profondità? Le calotte glaciali polari sono una fonte ovvia di grandi quantità di acqua dolce. Inoltre i cambiamenti bruschi sembrano limitarsi a epoche in cui grandi coltri glaciali ricoprivano il Canada e la Scandinavia. Da quando i periodi glaciali sono terminati, il clima globale ha mantenuto le caratteristiche attuali.

Vi sono prove di almeno otto invasioni di acqua dolce nell'Atlantico settentrionale: sette «flotte» di iceberg staccatisi dal margine orientale della coltre glaciale che ricopriva la baia di Hudson e un imponente flusso di acqua di fusione proveniente da un immenso lago che segnava il margine meridionale della coltre glaciale durante la ritirata dei ghiacci. All'inizio degli anni ottanta, ancora studente all'Università di Göttingen, Hartmut Heinrich scoprì una bizzarra stratificazione in sedimenti dell'Atlantico settentrionale. Gli strati si estendono dal Mare del Labrador alle Isole Britanniche, e le loro caratteristiche si spiegano nel modo più plausibile con la fusione di un enorme numero di iceberg distaccatisi dal Canada.

I detriti prodotti dalla fusione di questa flotta si assottigliano andando verso est, da uno spessore di mezzo metro nel Mare del Labrador a pochi centimetri nell'Atlantico orientale. Frammenti di calcari sedimentari e del basamento cristallino della Baia di Hudson e dell'area circostante costituiscono gran parte dei componenti a maggiore granulometria di quei sedimenti. I gusci di foraminiferi si trovano solo di rado in questi strati, e ciò indica che l'oceano doveva essere ingombro di ghiacci marini; il basso rapporto ossigeno 18/ossigeno 16 nei gusci presenti mostra senza ambiguità che gli animali vivevano in acque molto meno saline del normale. (Alle alte latitudini la pioggia e la neve sono povere di ossigeno 18 poiché l'acqua «pesante» che contiene questo isotopo condensa preferibilmente dall'atmosfera quando le masse d'aria si raffreddano.)

L'ottavo apporto di acqua dolce venne dal Lago Agassiz, un immenso specchio d'acqua intrappolato nella depressione generata dal peso della coltre glaciale in via di ritiro. Dapprima l'acqua proveniente dal lago, superando una soglia, finiva nel bacino idrografico del Mississippi e poi si riversava nel Golfo del Messico. Circa 12 000 anni fa la ritirata del fronte glaciale aprì un canale verso est, provocando una catastrofica discesa del livello del lago. L'acqua lasciata defluire da questa breccia si riversò attraverso il Canada meridionale, fino alla valle ora occupata dal San Lorenzo, andando a scaricarsi direttamente nella regione di oceano dove attualmente si formano le acque profonde.

La connessione tra questi eventi e i cambiamenti climatici globali è chiara. Quattro di essi avvennero in epoche corrispondenti a cambiamenti significativi del clima dell'Atlantico settentrionale. Uno degli strati identificati da Heinrich segna la fine del penultimo ciclo glaciale principale, e un altro quella del ciclo più recente. Un terzo strato sembra corrispondere all'instaurarsi delle condizioni glaciali nell'Atlantico settentrionale, e la catastrofica fuoriuscita delle acque del Lago Agassiz coincise con l'inizio del Dryas recente. Ognuno dei quattro eventi rimanenti corona un sottociclo climati-

RAGGI COSMICI
ATMOSFERA
AZOTO 14
CARBONIO 14
IL CARBONIO 14 ENTRA NEL MARE PER EFFETTO DEGLI SCAMBI GASSOSI
STRATI SUPERFICIALI CALDI
IL CARBONIO 14 RAGGIUNGE GLI STRATI PROFONDI
STRATI PROFONDI FREDDI
IL CARBONIO 14 DECADE IN AZOTO 14 (1 PER CENTO IN 82 ANNI)
Jana Brenning

Il processo di formazione delle acque profonde sottrae il carbonio 14 radioattivo all'atmosfera e agli strati superficiali dell'oceano per convogliarlo a profondità abissali. La datazione con il radiocarbonio permette di misurare indirettamente lo stato del meccanismo di convezione oceanica, in quanto ogni suo arresto prolungato causa un incremento di carbonio 14 nell'atmosfera, falsando le età apparenti dei resti organici.

I dati ottenuti dalle carote di ghiaccio (*in alto*) testimoniano la variabilità del clima negli ultimi 100 000 anni. In campioni ottenuti perforando il ghiaccio fino al basamento roccioso al centro della Groenlandia, si è misurata la concentrazione relativa di ossigeno 18 e ossigeno 16. (Le carote in attesa di analisi sono mostrate a destra, custodite a bassa temperatura.) La quantità di ossigeno 18 nel vapore acqueo atmosferico dipende dalla temperatura dell'aria: più freddo è il clima, minore è la quantità di acqua che contiene l'isotopo pesante. In una sezione di carota vista al microscopio (*a destra in alto*) si notano i singoli cristalli di ghiaccio, grazie alla differente trasmissione della luce polarizzata, e le bolle d'aria intrappolate, dalle quali si può ricavare la composizione atmosferica al tempo della formazione del campione (*al centro*). Gli strati più profondi (*in basso*) sono stati deformati dal flusso della coltre glaciale sull'irregolare superficie della Groenlandia, e ciò rende le misurazioni difficili o impossibili.

co. Gerard C. Bond del Lamont-Doherty Earth Observatory della Columbia University ha correlato gli strati di Heinrich ai dati ottenuti dalle carote di ghiaccio della Groenlandia e ha scoperto che gli eventi freddi di durata millenaria avvennero in gruppi caratterizzati da ondate fredde sempre più rigide, culminando con un evento di Heinrich seguito a sua volta da un significativo riscaldamento, che segna l'inizio di un nuovo ciclo.

Il mutamento climatico del Dryas recente fece avvertire i propri effetti in tutto il pianeta. Si può dire lo stesso per la quindicina di eventi che la precedono nella documentazione fornita dalle carote di ghiaccio? Finora gli indizi che puntano in tale direzione sono solo due, ma molto convincenti. Il primo è stato fornito da Jerome A. Chappellaz del Laboratorio di glaciologia e geofisica dell'ambiente di Grenoble, il quale ha analizzato l'aria intrappolata nelle carote di ghiaccio della Groenlandia e ha scoperto come i periodi freddi fossero accompagnati da una riduzione dei livelli di metano dell'atmosfera. Il metano è prodotto soprattutto nelle paludi e negli acquitrini e dato che, nelle regioni temperate boreali, questi erano gelati durante le glaciazioni, il gas presente nell'atmosfera poteva venire soltanto dalle regioni tropicali. Le fluttuazioni dei livelli di metano implicano che i tropici si siano inariditi durante ciascun episodio freddo delle regioni boreali.

Il secondo indizio viene da uno studio non ancora pubblicato di James P. Kennett e Richard J. Behl dell'Università della California a Santa Barbara, relativo a una carota di sedimenti marini recuperata a 500 metri di profondità nel bacino di Santa Barbara. I ricercatori hanno osservato che bande di sedimento indisturbato caratterizzate da chiari staterelli annuali si alternavano con sezioni più o meno disturbate da vermi limivori. La presenza dei vermi implica che l'acqua di fondo di quella zona conteneva una quantità di ossigeno sufficiente a permettere la vita; tali periodi mostrano una correlazione inequivoca con le ondate fredde in Groenlandia, e ciò implica che i cambiamenti della circolazione oceanica si fecero risentire in tutto il globo.

Più sorprendente è che gli eventi di Heinrich sembrerebbero avere lasciato il segno ovunque. Eric Grimm dell'Illinois State Museum e colleghi hanno campionato pollini nei sedimenti del Lago Tulane, in Florida, riscontrando un netto picco nel rapporto fra pino e quercia in corrispondenza di ogni evento di Heinrich. I pini prosperano in condizioni climatiche relativamente umide, mentre le querce prediligono ambienti più asciutti. Sebbene la relazione tra intervalli caratterizzati da abbondanza di pini ed eventi di Heinrich attenda conferma da datazioni al radiocarbonio, la documentazione pollinica del Lago Tulane indica un intervallo umido per ciclo. George H. Denton dell'Università del Maine e collaboratori hanno scoperto una corrispondenza ancora più remota: ognuno dei quattro eventi di Heinrich che è possibile datare con il radiocarbonio corrisponde a un netto massimo di estensione dei ghiacciai montani della catena andina.

La scoperta che la massiccia disgregazione dei ghiacci canadesi ebbe un impatto globale crea un paradosso. I modelli atmosferici indicano che i mutamenti climatici legati alle variazioni della quantità di calore ceduta all'atmosfera nell'Atlantico settentrionale dovrebbero limitarsi alle zone circostanti. I dati raccolti richiedono invece un meccanismo che consenta a questi effetti di estendersi fino ai tropici, alle regioni temperate australi e addirittura all'Antartide.

La distribuzione simmetrica di questi cambiamenti climatici attorno all'equatore è imperniata sui tropici. Mutamenti nella dinamica dell'atmosfera tropicale potrebbero facilmente avere effetti a vasto raggio. Le celle di convezione a forte sviluppo verticale che si formano ai tropici laddove gli alisei si incontrano forniscono all'atmosfera il suo gas-serra principale, il vapore acqueo. Sebbene il legame fra la circolazione oceanica e la convezione tropicale sia tenue, sembra plausibile che schemi anomali di circolazione possano alterare la quantità di acqua fredda che risale in superficie lungo l'equatore nel Pacifico. Queste correnti di risalita (*upwelling*) sono una voce importante nel bilancio termico di quella regione e hanno un'influenza sul clima in generale. Una riduzione delle correnti equatoriali di risalita, quale si ha attualmente durante i cosiddetti periodi di El Niño, può causare siccità in una regione e inondazioni in un'altra.

Gli elementi a sostegno di un tale scenario non vengono solo dai dati di Chappellaz che mostrano episodi di siccità ai tropici, ma anche dalle documentazioni storiche sull'andamento dei tassi di umidità in Nevada, New Mexico, Texas, Florida e Virginia. La prova più consistente viene dalla regione del Great Basin, negli Stati Uniti occidentali: immediatamente dopo l'ultimo evento di Heinrich, circa 14 000 anni fa, il Lago Lahontan, nel Nevada, raggiunse le sue dimensioni massime, 10 volte maggiori di ciò che oggi ne rimane. Il mantenimento di un corpo d'acqua così cospicuo richiede un'immensa quantità di precipitazioni, paragonabile a quella record dell'inverno 1982-1983, in periodo di El Niño. Per rendersi conto dell'impatto di questi avvenimenti, si immaginino cambiamenti della circolazione oceanica tali da causare periodi di El Niño di durata millenaria.

Norman Tomalin, Bruce Coleman, Inc.

Stefan Lundgren, The Wildlands Collection

Fridmar Damm, Leo de Wys

Boris Dmitriev

Le conseguenze sull'Europa di uno sconvolgimento della circolazione delle acque profonde nell'Atlantico settentrionale sarebbero drastiche. A Dublino (*in alto a sinistra*) si instaurerebbe un clima simile a quello che ora caratterizza le Isole Svalbard. Londra (*in basso a sinistra*) sperimenterebbe i rigori invernali propri della città di Irkutsk, in Siberia.

Scoperte più recenti, dovute a Lonnie G. Thompson della Ohio State University, confermano ulteriormente che il clima tropicale era radicalmente diverso durante le epoche glaciali. Antiche carote di ghiaccio prelevate a quote di 6000 metri nelle Ande tropicali contengono quantità di particellato fine 200 volte superiori a quelle contenute in campioni recenti. Questa polvere era probabilmente portata da venti che provenivano da una Amazzonia arida. Il ghiaccio più antico è anche povero di ossigeno 18 in confronto a quello formatosi a partire da 10 000 anni fa, e ciò implica una temperatura di 10 gradi inferiore rispetto a oggi. Considerato inoltre che la linea delle nevi persistenti nelle Ande si abbassò di 1000 metri durante le epoche glaciali, l'insieme dei dati fa pensare che i tropici fossero più freddi e più secchi nel corso delle glaciazioni.

Sembra ormai assodato che il sistema climatico della Terra sia bruscamente passato in più occasioni da un modo di funzionamento a un altro. Sfortunatamente dobbiamo ancora capire le cause di questi cambiamenti. Per quanto le riorganizzazioni a grande scala della circolazione oceanica sembrino la causa più plausibile, non è detto che non si scoprano meccanismi atmosferici che possono aver innescato queste variazioni.

Questa situazione ci lascia nell'incertezza per quanto riguarda la possibilità di previsioni climatiche. Potrebbe l'attuale accumulo di gas-serra mettere in moto una nuova riorganizzazione del trasporto delle acque profonde e delle configurazioni climatiche che da esso dipendono? Da un lato, le testimonianze paleogeografiche indicano che i repentini mutamenti climatici sono stati limitati a epoche nelle quali l'Atlantico settentrionale era circondato da enormi coltri glaciali, una situazione da cui siamo lontani come non mai. D'altro canto, l'entità dell'effetto serra promette di essere di gran lunga più cospicua di quanto sia avvenuto in ogni altro periodo interglaciale, e non vi è alcuna certezza che il sistema rresti stabilmente nella configurazione attuale, relativamente benigna.

Un arresto del nastro trasportatore o un cambiamento parimenti drastico sono poco probabili, ma se mai dovessero verificarsi, l'impatto sarebbe catastrofico. La massima probabilità di un tale evento dovrebbe collocarsi tra 50 e 150 anni dal presente, proprio in un periodo che sarà particolarmente difficile per un'umanità alle prese con problemi di sussistenza e per un ambiente soggetto a una fortissima pressione antropica. È dunque necessario considerare seriamente questa possibilità. Non dovremmo lesinare sforzi per acquisire una migliore comprensione del comportamento caotico del sistema climatico globale.

WALLACE S. BROECKER è professore di geologia al Lamont-Doherty Earth Observatory della Columbia University, presso la quale si è laureato nel 1958. Da oltre 40 anni studia i cambiamenti climatici e la circolazione oceanica.

BROECKER WALLACE S. e DENTON GEORGE H., *I fattori di controllo dei cicli glaciali* in «Le Scienze», n. 259, marzo 1990.

DANSGAARD W. e altri, *Evidence for General Instability of Past Climate from A250-KYR Ice-Core Record* in «Nature», 364, 15 luglio 1993.

CHAPPELLAZ J., BLUNIER T., BARNOLA J. M., SCHWANDER J. e STAUFFFER B., *Synchronous Changes in Atmospheric CH_4 and Greenland Climate between 40 e 8 KYR BP* in «Nature», 366, 2 dicembre 1993.

MacAYEAL D. R., *A Low-Order Model of the Heinrich Event Cycle* in «Paleoceanography», 8, n. 6, dicembre 1993.

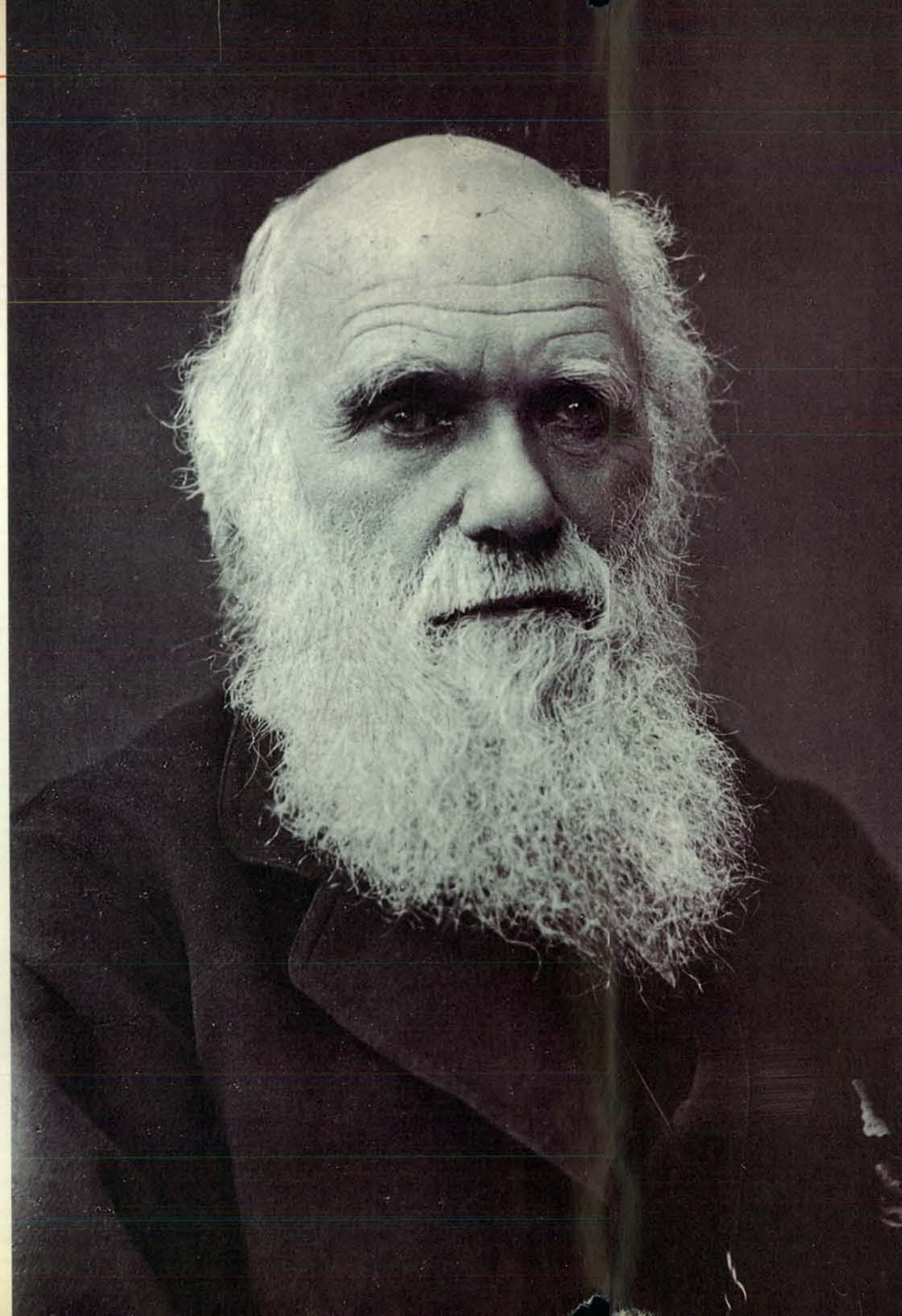
DOCUMENTI

L'ultimo ritratto di Darwin

È stata scoperta di recente quella che probabilmente è l'ultima fotografia del grande scienziato

di Richard Milner

«SONO MOLTO DOLENTE DI DELUDERE I FOTOGRAFI - SCRIVE CHARLES DARWIN - MA NON POSSO SOPPORTARE L'IDEA DI STARE DI NUOVO IN POSA PER LORO.»

The Huntington Library

Charles Darwin cercò per tutta la vita di evitare le occasioni di comparire in pubblico sfuggendo metodicamente ai pranzi ufficiali, alle conferenze e all'obiettivo dei fotografi. Tuttavia qualcuno riuscì a riprenderlo. Tra questi vi fu Herbert Rose Barraud (1845-1896), il fotografo delle celebrità dell'epoca vittoriana, che eseguì un ritratto di Darwin nel 1881, l'anno della sua morte. L'inedito ritratto, recentemente riscoperto, è stato acquistato dalla Huntington Library di San Marino, in California.

Negli ultimi vent'anni, Gene Kritsky, entomologo del College of Mount St. Joseph di Cincinnati, è riuscito a mettere insieme circa 53 fotografie di Darwin, inclusa una immagine stereoscopica. Quando il nuovo ritratto acquisito dalla Huntington Library saltò fuori in mezzo a una cospicua donazione di materiale relativo a Darwin, lo storico della scienza Ralph Colp, Jr. chiese a Kritsky di identificarla. Dai riferimenti contenuti nella sua collezione Kritsky poté risalire al nome del fotografo e alla data in cui fu eseguito il ritratto, quasi sicuramente l'ultimo dello scienziato.

Tutti coloro che si recavano a far visita a Darwin rimanevano vivamente impressionati dal suo volto, che ne esprimeva interamente il carattere. Un collega ne descrisse l'aspetto «contemplativo», che era «penetrante quanto meditativo». Il suo sguardo aveva «la profondità e la sensibilità di colui a cui nulla sfugge... i suoi occhi sembravano scrutare sotto la superficie delle cose». Un altro visitatore di Down House nel Kent vide nell'anziano scienziato «un Socrate redivivo... con l'alta fronte bombata che caratterizza i pensatori». Francis Darwin ricorda che suo padre «non si rendeva conto che sarebbe stato riconosciuto dalle sue fotografie, e una volta fu imbarazzato dal fatto che uno sconosciuto l'aveva salutato al Crystal Palace Aquarium».

Nel 1869 un traduttore tedesco chiese a Darwin di posare per una foto insieme con Alfred Russel Wallace, l'amico-rivale e coscopritore dell'evoluzione per selezione naturale. Darwin si rifiutò di lasciare la sua casa di campagna per andare a Londra nello studio del fotografo che avrebbe dovuto fare lo storico doppio ritratto. «Stare in posa per un fotografo - egli scrisse - è una cosa che odio e che mi porta via un'intera giornata del poco tempo che la mia fragile salute mi lascia; e stare in posa assieme a un altro non farebbe che aumentare il fastidio e la perdita di tempo.» Anche i darwiniani più devoti, tuttavia, ammettono che il loro eroe non accettava di dividere con altri la «sua» teoria. Lo scorso anno a un discendente di Wallace, John Wallace, fu chiesto che cosa pensasse la sua famiglia del fatto che Darwin aveva completamente tenuto nell'ombra il lavoro del suo giovane collega. «Mio nonno non se ne preoccupava mai; - rispose questi con la massima cortesia - perché dovremmo farlo noi?»

RICHARD MILNER è autore di *The Encyclopedia of Evolution: Humanity's Search for Its Origins* (Henry Holt, 1993) e di *Charles Darwin: Evolution of a Naturalist* (Facts on File, 1994).

«PENETRANTE E MEDITATIVO, IL SUO SGUARDO AVEVA LA PROFONDITÀ E LA SENSIBILITÀ DI COLUI A CUI NULLA SFUGGE ... I SUOI OCCHI SEMBRAVANO SCRUTARE SOTTO LA SUPERFICIE DELLE COSE.»

La natura: un universo di indifferenza

L'uomo si è sempre chiesto quale sia il significato della vita; secondo l'autore, il suo unico scopo è quello di perpetuare la sopravvivenza del DNA

di Richard Dawkins

Nei suoi numerosi libri sull'evoluzione e sulla selezione naturale, Richard Dawkins esamina questi temi non dalla prospettiva dei singoli organismi (come fece Charles Darwin), bensì da quello che egli ha chiamato «il punto di vista del gene». Secondo lui i geni oggi presenti negli esseri viventi sono quelli «egoisti» che si sono assicurati la propria sopravvivenza perché hanno consentito ai loro ospiti (che Dawkins chiama «macchine da sopravvivenza») di vivere abbastanza per riprodursi. Dawkins sostiene che la complessità della vita può essere spiegata dall'imponente gara per la sopravvivenza tra i geni e non da qualche finalità superiore dell'universo.

Nel suo ultimo libro, River Out of Eden: A Darwinian View of Life, *Dawkins spiega come la lotta dei geni per replicarsi possa rispondere ad alcuni quesiti fondamentali, tra cui «come ebbe origine la vita?» e «perché siamo qui?». Questo articolo è basato su uno dei capitoli di* River Out of Eden *(BasicBooks, 1995).*

Composizione digitale di Tom Draper

«Non riesco a convincermi - scrisse Charles Darwin - che un Dio buono e onnipotente abbia potuto creare gli icneumonidi facendo deliberatamente in modo che si nutrissero del corpo di bruchi ancora vivi.» Anche altri gruppi di imenotteri, per esempio gli sfecidi studiati dal naturalista francese Jean Henri Fabre, hanno la macabra abitudine degli icneumonidi.

Fabre scrisse che prima di deporre l'uovo in un bruco (o in una cavalletta o in un'ape), gli sfecidi introducono con precisione il pungiglione in ogni ganglio del sistema nervoso centrale della preda per paralizzarla, senza tuttavia ucciderla. In questo modo la carne si conserva fresca per la larva che nascerà. Non si sa se la paralisi abbia un effetto anestetico generale o se, come il curaro, si limiti a bloccare i movimenti della vittima. Nel secondo caso, la preda potrebbe rendersi conto di essere mangiata viva da dentro, ma non riuscirebbe a muovere un muscolo per evitarlo. Questa sembra un'orribile crudeltà, ma come vedremo la Natura non è crudele, è solo inesorabilmente indifferente. Per noi uomini questo è uno dei fatti più difficili da comprendere: non sappiamo accettare qualcosa che non sia né buono né cattivo, né crudele né pietoso, ma semplicemente insensibile, indifferente a ogni sofferenza e privo di qualunque finalità.

La finalità è radicata nella nostra visione del mondo: di fronte a qualunque cosa ci è difficile non chiederci a quale scopo è stata fatta, quale potrebbe essere la ragione o il fine che vi si cela. La tendenza a vedere un fine in ogni cosa è naturale in un animale che vive circondato da macchine, opere d'arte, strumenti e altri manufatti; un animale, per di più, i cui pensieri, per lo meno da sveglio, sono dominati da scopi, obiettivi e programmi.

Benché di fronte a un'automobile, a un apriscatole, a un cavatappi o a un forcone sia legittimo chiedersi a che cosa serva, il semplice fatto di poter formulare una domanda non significa che essa sia legittima o sensata. Vi sono molte cose per le quali si può chiedere «che temperatura ha?» oppure «di che colore è?», ma non si può chiedere la temperatura o il colore, per esempio, della gelosia o della preghiera. Analogamente è giusto chiedersi «a che scopo?» a proposito dei parafanghi di una bicicletta o della diga di Kariba; ma non si deve credere che la stessa domanda abbia senso quando la si ponga a proposito di un masso, di una disgrazia, del monte Everest o dell'universo. Certe domande sono semplicemente assurde, per quanto benintenzionato sia chi le formula.

In una posizione intermedia fra i tergicristalli e gli apriscatole, da una parte, e le rocce e l'universo, dall'altra, si situano gli esseri viventi. I corpi degli esseri viventi e i loro organi sono oggetti che, a differenza delle rocce, sembrano portare impressa in sé la finalità.

Naturalmente è ben noto che l'apparente finalismo degli esseri viventi ha improntato le concezioni dei teologi, da san Tommaso d'Aquino all'inglese William Paley. Quest'ultimo, per esempio, sosteneva in pieno Settecento che se un oggetto relativamente semplice come un orologio postula un orologiaio, allora le creature viventi, che sono tanto più complesse, devono per forza essere state create da Dio. Anche i moderni creazionisti «scientifici» aderiscono a questo argomento del divino Architetto.

Oggi si capisce bene per quale meccanismo tutto ciò che riguarda la vita (ali, occhi, becchi, istinto di nidificazione e quant'altro) dia la tenace illusione del progetto finalistico: questa illusione è dovuta alla selezione naturale di Darwin. Darwin capì che gli organismi che vediamo esistono perché i loro antenati possedevano caratteri che permisero a loro e alla loro progenie di prosperare, mentre gli individui meno adatti morirono lasciando pochi o punti discendenti.

È sorprendente che abbiamo cominciato a capire l'evoluzione solo da pochissimo tempo, non più di un secolo e mezzo. Prima di Darwin, anche le persone colte, che non si domandavano più

Le «macchine da sopravvivenza», come l'autore chiama gli esseri viventi, sono state congegnate dalla selezione naturale per propagare il DNA. Il ghepardo costituisce uno degli esempi più perfetti.

Hans Reinhard Bruce Coleman, Inc. (ghepardo); Video Surgery Photo Researchers, Inc. (osso); Ken Eward BioGrafx, Science Source, Photo Researchers, Inc. (DNA)

Pat Greany USDA

Scott Nielsen Bruce Coleman, Inc.

Gregory G. Dimijian Photo Researchers, Inc.

Norbert Wu

La varietà della vita riflette le originalissime tecniche che il DNA adotta per garantirsi la sopravvivenza. Per esempio i muscoli delle zampe consentono al ghepardo di cacciare le gazzelle, che a loro volta sono attrezzate per battere in velocità il ghepardo. In questa lotta che ha per posta la vita, entrambi gli animali cercano di assicurare la sopravvivenza del loro DNA. Le vespe parassite cercano di massimizzare la sopravvivenza dei loro geni a spese dei bruchi: una femmina di vespa prima di deporre l'uovo in un bruco lo paralizza col pungiglione. Dopo la schiusa, la larva di vespa si nutre del bruco ancora vivo. Le caratteristiche fisiche esibite nell'accoppiamento sono altrettanto specializzate. Molti uccelli, tra cui il fagiano dell'Himalaya, e molti pesci, tra cui questi emulidi, sfoggiano un caleidoscopio di colori per attrarre la compagna e garantire la propagazione del DNA. Anche le piante competono per la riproduzione. Le foreste pluviali svettano verso il cielo perché ciascun albero cerca di ricevere più luce solare e di diffondere al massimo la propria discendenza.

David Madison, Bruce Coleman, Inc.

«a che scopo» di fronte a rocce, torrenti ed eclissi, ritenevano comunque legittimo porre questa domanda a proposito degli esseri viventi. Oggi solo chi non abbia alcuna cultura scientifica potrebbe nutrire una curiosità del genere. Ma questo «solo» non faccia dimenticare che stiamo comunque parlando della maggioranza assoluta della popolazione mondiale.

La progettazione di una macchina da preda perfetta

Darwin riteneva che la selezione naturale favorisse gli individui più adatti a sopravvivere e a riprodursi. Ciò equivale a dire che la selezione naturale favorisce quei geni che si replicano per molte generazioni. Benché le due formulazioni siano più o meno equivalenti, il «punto di vista del gene» presenta molti vantaggi, che risultano evidenti quando si considerino due concetti tecnici: l'ingegneria inversa e la funzione di utilità.

L'ingegneria inversa è una tecnica di ragionamento che procede in questo modo: supponiamo che un ingegnere si imbatta in un manufatto che non riesce a comprendere; allora fa l'ipotesi di lavoro che esso sia stato costruito per qualche scopo. Quindi smonta e analizza l'oggetto, tentando di immaginare quale funzione esso potrebbe avere: «Se avessi voluto costruire una macchina per fare questa determinata cosa, l'avrei fatta così? Oppure per spiegare l'oggetto è meglio immaginare che esso sia stato costruito per fare quest'altra cosa?».

Oggi, nell'era dell'elettronica, il regolo calcolatore, che fino a tempi recenti è stato il talismano dell'onorata professione dell'ingegnere, è superato quanto un vestigio dell'Età del bronzo. Un archeologo del futuro che trovasse un regolo calcolatore e se ne chiedesse lo scopo, noterebbe forse che si presta tanto a tracciare linee rette quanto a imburrare una fetta di pane. Ma in un semplice righello o in una spatola non ci sarebbe bisogno di quell'elemento scorrevole al centro. Inoltre le sue precise scale logaritmiche sono disegnate con troppa esattezza per essere accidentali. All'archeologo verrebbe in mente che in un'era in cui non fossero esistiti ancora i calcolatori elettronici quest'oggetto avrebbe costituito un ingegnoso strumento per eseguire con rapidità moltiplicazioni e divisioni. Il mistero del regolo calcolatore sarebbe quindi risolto grazie all'ingegneria inversa, in base a una ipotesi di progetto intelligente ed economico.

«Funzione di utilità» è un termine tecnico proveniente non dall'ingegneria bensì dell'economia e significa «ciò che viene massimizzato». I pianificatori economici e gli ingegneri sociali si comportano più o meno come gli architetti e gli ingegneri meccanici, perché anch'essi si sforzano di ottimizzare qualcosa. Gli utilitaristi perseguono «la massima felicità per il massimo numero di persone». Altri mirano dichiaratamente ad accrescere la propria felicità a spese del benessere comune.

Se si applicasse l'ingegneria inversa alla politica di governo di un certo paese, si potrebbe magari concludere che le variabili che vengono ottimizzate sono l'occupazione e il benessere universali. Per un altro paese la funzione di utilità potrebbe risultare la permanenza al potere del presidente, la ricchezza della famiglia regnante, la consistenza dell'harem del sultano, la stabilità del Medio Oriente o quella del prezzo del petrolio. Il punto è che si possono immaginare parecchie funzioni di utilità. Che cosa cerchino di conseguire gli individui, le aziende o i governi non è sempre evidente.

Torniamo agli organismi viventi e cerchiamo di identificare la loro funzione di utilità. Ve ne potrebbero essere molte, ma alla fine si scoprirebbe che si riconducono tutte a una sola. Una maniera istruttiva di vivacizzare la nostra indagine consiste nell'immaginare che le creature viventi siano state costruite da un divino Ingegnere e tentare, mediante l'ingegneria inversa, di scoprire ciò che l'Ingegnere ha cercato di rendere massimo: cioè la «funzione di utilità di Dio».

I ghepardi dimostrano sotto tutti i punti di vista di essere magnificamente costruiti per qualcosa, e in questo caso dovrebbe essere abbastanza facile applicare l'ingegneria inversa per ricavare la loro funzione di utilità. Essi sembrano ben progettati per uccidere la gazzelle. Le zanne, gli artigli, gli occhi, il naso, i muscoli delle zampe, la colonna vertebrale e il cervello di un ghepardo sono proprio quelli che dovrebbero essere se lo scopo di Dio nel progettare questo animale fosse stato quello di rendere massimo il numero di gazzelle predate. Viceversa, se applichiamo l'ingegneria inversa a una gazzella, scopriamo prove altrettanto evidenti di un progetto che mira allo scopo esattamente contrario: far sopravvivere le gazzelle e far morire di fame i ghepardi.

È come se i ghepardi fossero stati progettati da un dio e le gazzelle da un dio rivale. Oppure, se è un unico Creatore ad aver fatto il lupo e l'agnello, il ghepardo e la gazzella, a che gioco sta giocando? È un sadico che gode nell'assistere a sport sanguinari? O tenta di evitare che i mammiferi africani crescano troppo di numero? Oppure si dà da fare per far aumentare l'indice di ascolto dei programmi sul comportamento degli animali? Queste sono tutte funzioni di utilità ragionevolissime, che potrebbero anche risultare corrette. In realtà, ovviamente, sono tutte sbagliate.

La vera funzione di utilità della vita, quella che viene massimizzata nel mondo naturale, è la sopravvivenza del DNA. Ma il DNA non vaga liberamente: è racchiuso negli organismi viventi e deve sfruttare al massimo le leve del potere che ha a disposizione. Le sequenze geniche che si trovano nel corpo del ghepardo rendono massima la propria sopravvivenza facendo sì che questo corpo uccida le gazzelle. Le sequenze che si trovano nel corpo della gazzella accrescono la propria probabilità di sopravvivere perseguendo il fine opposto. Ma è la stessa funzione di utilità, cioè la sopravvivenza del DNA, che spiega la «finalità» sia del ghepardo sia della gazzella.

Una volta accettato, questo principio spiega una grande varietà di fenomeni altrimenti sconcertanti, tra cui le battaglie (dispendiose in termini di energia e spesso comiche) combattute dai maschi per conquistare le femmine, compresi i loro investimenti in «bellezza». Spesso i rituali dell'accoppiamento assomigliano alle sfilate (oggi per fortuna passate di moda) per l'elezione di Miss Universo, ma con i maschi in parata sulla passerella. Dove quest'analogia si vede con grande evidenza è nel «lek» di certi uccelli, come il gallo della salvia o l'uccello combattente. Il lek è l'appezzamento di terreno sul quale gli uccelli maschi si pavoneggiano davanti alle femmine. Le femmine si recano al lek e, dopo aver osservato le tronfie esibizioni di parecchi maschi, ne scelgono uno e si accoppiano. I maschi delle specie da lek hanno spesso bizzarre livree, che esibiscono con scatti o inchini altrettanto vistosi, emettendo strani rumori. Gli aggettivi «bizzarro» e «vistoso» riflettono naturalmente giudizi di valore soggettivi.

È presumibile che quando danzano pomposamente sul lek, accompagnandosi con rumori come di bottiglie stappate, i maschi del gallo della salvia non sembrino affatto buffi alle femmine della loro specie, e questa è la cosa che conta. In certi casi accade che il concetto di bellezza di una femmina coincida con il nostro: ne sono un esempio il pavone o l'uccello del paradiso.

La funzione della bellezza

Il canto dell'usignolo, la coda del fagiano, la fosforescenza della lucciola e le squame iridate dei pesci tropicali rendono massima la bellezza estetica, ma non si tratta, o solo per caso, di una bellezza fatta per il nostro diletto. Che noi godiamo lo spettacolo è un corollario,

un risultato del tutto accidentale. I geni che rendono i maschi attraenti per le femmine vengono automaticamente trasmessi alle generazioni successive. C'è un'unica funzione di utilità che dia un senso a tutte queste diverse manifestazioni della bellezza: la quantità che viene puntigliosamente ottimizzata in ogni minuscola nicchia del mondo vivente è, in ogni caso, la sopravvivenza del DNA che presiede alla caratterica che vogliamo di volta in volta interpretare. Questo impulso giustifica anche certi misteriosi eccessi della natura. Per esempio, il pavone è carico di fronzoli così pesanti e ingombranti da essere gravemente ostacolato nei suoi tentativi di svolgere un lavoro utile (se fosse incline a svolgere qualche lavoro utile, ma in genere non lo è). I maschi degli uccelli canori dedicano al canto una quantità esorbitante di tempo e di energia. Questa smodata attività rappresenta un pericolo, non solo perché attira gli animali da preda, ma anche perché consuma molta energia e porta via del tempo che potrebbe essere impiegato per reintegrare quell'energia. Uno specialista di scriccioli riferì che uno dei suoi maschi selvatici cantò letteralmente fino a morirne. Qualsiasi funzione di utilità che avesse a cuore il benessere a lungo termine della specie - o anche solo la sopravvivenza individuale di un determinato maschio - limiterebbe l'attività canora, le parate e le lotte fra maschi.

Il Grande Livellatore

Uno dei metodi con cui gli organismi pluricellulari massimizzano la sopravvivenza del DNA consiste nel non sprecare troppa energia per assicurare una durata indefinita degli organi. I fabbricanti di automobili usano un metodo simile. Questa interessante analogia fu elaborata dallo psicologo darwinista Nicholas Humphrey quand'era all'Università di Cambridge. Nel libro *Consciousness Regained: Chapters in the Development of Mind*, Humphrey immagina che Henry Ford, il nume tutelare dell'efficienza produttiva, una volta

> ...avesse commissionato un'indagine nei cimiteri di automobili degli Stati Uniti per scoprire se ci fossero dei pezzi della Ford Modello T che non si fossero mai rotti. Gli ispettori elencarono guasti di ogni tipo: assali, freni, pistoni... tutto era soggetto a rottura, con una singolarissima eccezione: tutti i perni del fuso a snodo dei rottami avevano ancora in sé anni di vita. Con un cinismo inesorabile, Ford concluse che i perni del fuso a snodo del Modello T erano troppo durevoli rispetto al compito loro affidato e ordinò che in seguito venissero costruiti con caratteristiche inferiori.

Bettmann Archive

Il Modello T non era fatto per durare in eterno, quindi sarebbe stato sprecato dotarlo di pezzi indistruttibili.

Può darsi che anche voi, come me, non sappiate con esattezza che cosa siano i perni del fuso a snodo, ma non ha importanza: sono componenti di cui un'automobile ha bisogno. L'asserito cinismo di Ford, in effetti, era frutto di una logica incontrovertibile. L'alternativa sarebbe stata di migliorare tutte le altri parti dell'automobile per portarle a livello dei perni del fuso a snodo. Ma allora il prodotto non sarebbe stato il Modello T, bensì una Rolls-Royce, e questo non era l'obiettivo dell'azienda. La Rolls-Royce è un'automobile rispettabilissima, come pure il Modello T, ma il prezzo è diverso. Il punto sta nel fare in modo che la macchina sia fabbricata tutta secondo le specifiche della Rolls-Royce oppure tutta secondo le specifiche del Modello T. Se si costruisse un ibrido, con alcune componenti a livello del Modello T e alcune a livello della Rolls-Royce, si avrebbero gli svantaggi di entrambe le macchine, perché l'automobile verrebbe buttata via quando si usurasse il pezzo più debole e il denaro speso nei pezzi di qualità superiore, che non avrebbero mai il tempo di usurarsi, sarebbe semplicemente sprecato.

La lezione di Ford vale a maggior ragione per gli organismi viventi, perché i pezzi delle automobili possono, entro certi limiti, essere sostituiti. I gibboni vivono sugli alberi e corrono sempre il rischio di cadere e di fratturarsi qualche osso. Supponiamo di aver commissionato un esame statistico per rilevare dai cadaveri dei gibboni la frequenza con cui si frattura ciascuna delle ossa principali del corpo, e supponiamo di avere scoperto che prima o poi tutte le ossa si rompono tranne una: il perone (il piccolo osso parallelo alla tibia), che non si è mai trovato rotto in alcun gibbone. Ford avrebbe ordinato senza esitazioni di riprogettare il perone secondo specifiche inferiori, e questo è proprio ciò che fa anche la selezione naturale. Gli individui mutanti dotati di perone meno resistente, per i quali le regole di sviluppo imponevano una sottrazione di prezioso calcio al perone, potevano usare il materiale risparmiato per ispessire altre ossa del corpo e raggiungere così la situazione ideale in cui tutte le ossa hanno la stessa probabilità di fratturarsi. Oppure questi individui potevano usare il calcio risparmiato per produrre più latte e allevare quindi più figli. È possibile sottrarre senza rischi un po' di materiale al perone, almeno finché la sua probabilità di rottura eguaglia quella dell'osso immediatamente meno resistente. L'alternativa, ossia la «soluzione Rolls-Royce» di portare tutte le altre ossa al livello del perone, è più difficile da attuare.

E. R. Degginger Animals Animals

Neppure il gibbone è stato progettato dalla natura con parti indistruttibili.

La selezione naturale favorisce un livellamento della qualità sia verso l'alto sia verso il basso, fino a raggiungere un giusto equilibrio fra tutte le parti del corpo. Dal punto di vista della selezione naturale, l'invecchiamento e la morte per vecchiaia sono le sgradevoli conseguenze di quest'azione di bilanciamento. Siamo i discendenti di una lunga successione di antenati giovani, a cui i geni assicuravano vitalità negli anni della riproduzione, ma non davano alcuna garanzia di vigore negli anni successivi. Una giovinezza sana è essenziale per assicurare la sopravvivenza del DNA, ma una vecchiaia sana può essere un lusso simile a quello degli eccellenti perni del fuso a snodo del Modello T.

Tuttavia, quando si consideri la selezione naturale anche dal punto di vista dei geni, e non solo sotto il profilo della sopravvivenza e della riproduzione individuali, spiegare questi comportamenti è facile. Dato che ciò che viene massimizzato negli scriccioli è in realtà la sopravvivenza del DNA, nulla può arrestare la propagazione di quel patrimonio genico il cui unico effetto benefico sia quello di rendere i maschi attraenti per le femmine. Se certi geni conferiscono ai maschi qualità che per le femmine della specie risultano desiderabili, questi geni, volere o no, sopravviveranno, anche se talvolta possono mettere in pericolo la vita di alcuni individui.

Gli esseri umani hanno l'amabile tendenza a supporre che «benessere» significhi benessere del gruppo, che per «bene» si intenda bene della società o prosperità della specie o addirittura dell'intero ecosistema. La funzione di utilità di Dio, come la si evince da un'osservazione realistica della selezione naturale, risulta purtroppo in contrasto con queste visioni utopiche. Certo, vi sono circostanze nelle quali i geni possono massimizzare il loro egoistico benessere programmando nell'organismo una cooperazione altruistica o addirittura un sacrificio di sé; ma il benessere del gruppo è sempre una conseguenza fortuita, non la motivazione principale.

Quando ci si rende conto che i geni sono egoisti, si capiscono anche certi eccessi del regno vegetale. Perché nelle foreste gli alberi sono tanto alti? Semplicemente per superare i rivali. Una funzione di utilità «sensata» farebbe in modo che gli alberi fossero tutti bassi. In tal caso ciascuno di essi riceverebbe esattamente la stessa quantità di luce solare, investendo molto meno in grossi tronchi e in rami robusti. Ma se fossero tutti bassi, basterebbe che un singolo albero variante crescesse un pochino di più e la selezione naturale non potrebbe fare altro che favorirlo. Essendo stato aumentato il piatto, tutti gli altri, come a poker, dovrebbero rispondere. Questo processo continuerebbe senza che nulla potesse arrestarlo, e gli alberi diventerebbero tutti assurdi campioni di altezza e di sperpero. Ma tutto ciò è assurdo e antieconomico solo dal punto di vista di un pianificatore economico razionale che ragionasse in termini di massimizzazione del rendimento e non di sopravvivenza del DNA.

Vi sono tantissime analogie ben note. Ai ricevimenti tutti parlano a voce tanto alta da arrochirsi. Il motivo è che ognuno parla al massimo volume. Se tutti si mettessero d'accordo per bisbigliare, sentirebbero tutti altrettanto bene senza sforzare tanto la voce e senza sprecare tante energie. Ma gli accordi di questo genere non funzionano se non sono imposti con la forza, perché c'è sempre qualche egoista che li infrange parlando a voce un po' più alta e, uno alla volta, gli altri sono obbligati a seguirlo. Un equilibrio stabile viene raggiunto solo quando ognuno grida per quanto fiato ha in corpo, cioè molto più forte di quanto consiglierebbe la «razionalità». Il freno imposto dalla cooperazione è spesso vanificato dall'instabilità interna. È raro che la funzione di utilità di Dio coincida col massimo bene per il massimo numero di individui. La funzione di utilità di Dio tradisce le proprie origini nel disordinato tafferuglio che si instaura all'insegna del vantaggio egoistico.

Un universo dove regna l'indifferenza

Tornando al nostro pessimistico punto di partenza, la massimizzazione della sopravvivenza del DNA non è certo una ricetta per la felicità. Purché il DNA venga trasmesso, non importa se qualcuno o qualcosa ne riceva sofferenza. I geni non si curano della sofferenza semplicemente perché non si curano di nulla.

Per i geni della vespa di Darwin è meglio che il bruco sia vivo, e quindi fresco, quando viene divorato, qualunque ne sia il costo in termini di sofferenza. Se la Natura fosse benevola, il bruco otterrebbe almeno la piccola grazia di essere anestetizzato prima di venire mangiato vivo da dentro. Ma la Natura non è né benevola né malevola, non è né pro né contro la sofferenza. La Natura non si cura del tipo di sofferenze che infligge, purché queste sofferenze non interferiscano con la sopravvivenza del DNA. È facile immaginare un gene che, per esempio, tranquillizzi la gazzella quando sta per essere azzannata a morte. La selezione naturale favorirebbe un gene siffatto? Soltanto se l'effetto calmante sulla gazzella aumentasse la probabilità che quel gene potesse venire trasmesso alle generazioni future. Ma non c'è motivo per cui le cose debbano andare a questo modo, e possiamo quindi supporre che le gazzelle provino un dolore e uno spavento indicibili quando vengono inseguite e uccise, come prima o poi capita alla maggior parte di esse.

Il dolore che ogni anno provano gli organismi viventi di tutto il pianeta supera ogni possibile immaginazione. Nel minuto che mi occorre per scrivere questa frase, migliaia di animali vengono mangiati vivi, altri fuggono gemendo di terrore per salvarsi la vita, altri vengono lentamente scarnificati dai loro parassiti interni, migliaia di esseri di ogni sorta muoiono di fame, di sete e di malattie. Così dev'essere. Se mai capita un periodo di abbondanza, subito la popolazione aumenta finché non si ripristina lo stato naturale di penuria e di tribolazione.

In questo universo di elettroni e di geni egoisti, di cieche forze fisiche e di replicazione genetica, alcune persone soffrono, altre sono fortunate, e in tutto ciò non si troverà mai alcun senso, alcuna ragione, alcuna giustizia. L'universo che noi contempliamo ha esattamente le proprietà che ci aspetteremmo se, alla base, non vi fosse alcun progetto, alcuna finalità, se non vi fosse né il bene né il male, null'altro che crudele indifferenza. Come cantò il melanconico poeta inglese Alfred Edward Housman:

> Perché la Natura, la Natura
> senza cuore e senza ragione
> nulla sente e nulla sa.

Il DNA nulla sente e nulla sa. Il DNA semplicemente esiste, e noi non possiamo fare altro che danzare alla sua musica.

RICHARD DAWKINS, di nazionalità britannica, è nato in Kenya nel 1941. Formatosi all'Università di Oxford, si è laureato in zoologia con la guida dell'etologo Niko Tinbergen. Dopo due anni all'Università della California a Berkeley, Dawkins è ritornato a Oxford dove è lettore in zoologia e associato al New College. Dawkins è assai noto anche al grande pubblico per avere pubblicato i libri *Il gene egoista* (Mondadori) e *L'orologiaio cieco* (Rizzoli).

DAWKINS RICHARD, *Il fenotipo esteso: il gene come unità di selezione*, Zanichelli, Bologna, 1986.

RIDLEY MARK, *Evolution*, Blackwell Scientific Publications, 1993.

DENNETT DANIEL C., *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life*, Simon & Schuster, 1995.

Le grotte ornate del Paleolitico

Per 25 000 anni gli antichi europei hanno espresso la loro cultura dipingendo e incidendo pareti di caverne; la grotta Chauvet, scoperta di recente in Francia, è un esempio fondamentale della loro arte

di Jean Clottes

Il 24 dicembre 1994 tre speleologi tornarono in una grotta presso Vallon-Pont-d'Arc, nell'Ardèche, dove qualche giorno prima avevano individuato uno stretto budello in fondo a una galleria. Scendendo, si ritrovarono in un complesso di ambienti sotterranei della lunghezza di parecchie centinaia di metri. La luce delle lampade rivelava pareti coperte di disegni e incisioni di animali: cavalli, rinoceronti, leoni, bisonti, uri, orsi, mammut, stambecchi; i tre scopritori scorsero anche un leopardo e, forse, una iena. Questa «arca di Noè» era ulteriormente ornata con segni simbolici, composizioni di segni puntiformi e mani impresse in positivo o in negativo. La grotta Chauvet, così battezzata dal nome di uno degli scopritori, è l'equivalente artistico delle grotte di Lascaux in Dordogna e di Altamira in Spagna: il suo rinvenimento fa dell'Ardèche una regione importante per l'arte preistorica.

Negli ultimi 10 anni sono stati scoperti in Francia 22 nuovi siti di arte parietale paleolitica, che portano a 150 il totale delle grotte ornate conosciute in questo paese. In precedenza l'ultima grande scoperta, risalente al luglio 1991, era stata quella della grotta Cosquer, che si apre ai piedi di una falesia, 37 metri sotto il livello del mare, a pochi chilometri da Marsiglia. Le pitture e le incisioni che essa contiene si sono conservate perché la galleria d'accesso è in salita: circa metà della cavità principale si trova al di sopra del livello del mare. Durante la fase culminante dell'ultima glaciazione, 20 000 anni fa, il mare era 110-120 metri più basso di quanto sia attualmente e la spiaggia si trovava a parecchi chilometri di distanza.

La diffusione della speleologia e l'effettuazione di ricerche sistematiche hanno permesso di rinvenire un buon numero di siti paleolitici che oggi sono di difficile accesso; tuttavia non conosciamo che una frazione minuscola dei siti ornati, perché la fragilità di queste opere ne ha spesso facilitato la distruzione. Quelle che ci sono giunte costituiscono, insieme con gli oggetti di arte mobile, una testimonianza fondamentale della cultura dei primi esseri umani moderni.

In Europa l'arte delle caverne fiorì durante il Paleolitico, in un periodo di circa 25 000 anni. Nella seconda metà del XIX secolo, curiosi ed eruditi cominciarono a descrivere le pitture e le incisioni visibili nelle caverne e a realizzarne i primi rilievi, con metodi rudimentali; queste scoperte portarono, all'inizio del XX secolo, al riconoscimento di un'arte parietale paleolitica, e lo studio delle opere e il confronto dei siti fornirono indizi sulla cultura e sulla psicologia di coloro che li avevano creati. Oggi l'analisi teorica di queste opere consente interpretazioni più obiettive e prudenti del loro significato.

Jean Clottes/Sygma

Cavalli, rinoceronti e uri (*qui sopra*) sono dipinti in nero e rosso sulle pareti della grotta Chauvet, scoperta nel dicembre 1994 presso Vallon-Pont-d'Arc nell'Ardèche; si tratta di uno dei più importanti siti di arte rupestre della Francia. Le pitture e le incisioni della grotta Chauvet hanno la particolarità di raffigurare un gran numero di rinoceronti, soggetto poco frequente nell'arte del Paleolitico. L'illustrazione qui a destra è una parte di un ampio «pannello» ornato nel quale sono visibili anche una renna, alcuni leoni delle caverne e punti rossi.

L'interpretazione delle pitture resta però un problema difficile: le teorie più affascinanti spesso non si rivelano all'altezza del compito. Tre anni fa, nella California occidentale, osservai all'ingresso di una grotta ornata tre tratti verticali dipinti in rosso. Negli anni venti l'abbé Breuil vi avrebbe visto delle frecce, dipinte da un popolo di cacciatori per propiziare la cattura di numerose prede. Negli anni sessanta André Leroi-Gourhan, applicando la sua teoria del simbolismo sessuale, avrebbe attribuito una valenza maschile a questi tratti verticali, posti nei pressi dell'ingresso della grotta la quale, essendo una cavità, aveva invece significato femminile. Queste due interpretazioni non sono incompatibili: in generale, sono gli uomini ad andare a caccia. La mia guida, un indiano che perpetuava la tradizione spirituale del luogo, trasmessa nella sua famiglia di generazione in generazione, mi spiegò tuttavia il significato dei tratti: essi stavano a indicare che la grotta era accessibile solo a coloro che avevano superato la seconda fase dell'iniziazione nella tribù. Senza le sue spiegazioni, come avrei potuto indovinarlo?

Grazie ai progressi dei metodi analitici, possiamo però datare con maggiore precisione i siti e ricostruire le tecniche utilizzate dagli artisti preistorici per dipingere e disegnare. In questo modo è anche possibile determinare le vie di diffusione delle tecniche e degli stili nella Francia di 20 000 anni fa.

A questo riguardo la grotta Chauvet è particolarmente importante e originale per la varietà e la natura degli animali rappresentati: essa è ricca di immagini di carnivori, e fra di esse stupiscono le prime pitture e incisioni note raffiguranti un gufo, un leopardo e, forse, una iena.

Ciascun sito importante possiede rappresentazioni originali o anche uniche: così la sola immagine nota di donnola è tracciata a carboncino nel Réseau Clastres, in Ariège. Nella grotta Cosquer alla fauna terrestre si affiancano animali marini: otto foche incise e tre pinguini dipinti in nero. Sono le sole raffigurazioni indiscutibili nell'arte preistorica di grandi pinguini, animali che, come molti altri che vivevano in Europa nel Paleolitico, sono scomparsi a causa dell'uomo.

La collocazione geografica dei siti spiega in parte queste specificità: la grotta Cosquer, per esempio, era a pochi chilometri dalla costa dove, nel Solutreano, durante l'ultima glaciazione, vivevano foche e pinguini; non stupisce quindi che gli artisti li abbiano rappresentati. Gli uomini del Paleolitico tuttavia non si proponevano una descrizione esatta della fauna: sceglievano i loro soggetti per ragioni culturali, rituali o religiose che variavano da gruppo a gruppo. Non è detto che gli animali raramente raffigurati fossero rari nell'ambiente: la renna, oggetto nel Paleolitico di una caccia non meno intensa di quella a cui erano sottoposti il cavallo e il bisonte - come testimoniano i resti alimentari - appare nell'arte parietale con frequenza assai minore di quelli. Nessun argomento di tipo naturalistico può spiegare il fatto che 150 mammut ornino le pareti della grotta di Rouffignac, in Dordogna, né che il numero di rinoceronti raffigurati nella grotta Chauvet sia oltre due volte superiore al totale di immagini di questi animali rinvenute in tutte le altre grotte d'Europa.

Le manifestazioni dell'arte paleolitica presentano tuttavia tratti comuni. Le rappresentazioni figurative mostrano solo animali, nella maggior parte dei casi grandi mammiferi come cavalli, bisonti, stambecchi, cervi, renne e mammut. Lo scenario non è mai raffigurato: non c'è la linea dell'orizzonte, né elementi astronomici come il Sole, la Luna

Jean Clottes/Sygma

o le stelle; così pure non sono rappresentati né la vegetazione, né mari, fiumi o montagne. Le figure umane sono rare: nella grotta Chauvet non ne è stata ancora individuata alcuna.

L'arte parietale è presente in ogni parte del mondo: si trovano ripari sotto roccia o massi ornati in Australia, in Namibia, in Brasile, in Scandinavia, in Siberia e in Cina. Lo studio di quest'arte nelle regioni dove viene tuttora praticata, particolarmente in Australia, ci illumina sulle possibili motivazioni degli artisti preistorici. Per gli aborigeni australiani, gli indiani d'America, i boscimani dell'Africa meridionale, l'arte rupestre ha scopi religiosi o magici; l'artista trasmette miti e leggende. L'arte preistorica era probabilmente legata ad attività rituali: andare in grotte profonde, dove la luce del giorno non penetra mai, è contrario a istinti profondi dell'uomo; significa andare nel mondo oscuro della morte, là dove regnano gli spiriti.

Dobbiamo tuttavia diffidare delle spiegazioni che appaiono evidenti. L'evoluzione delle tecniche di ricerca ne ha dato una dimostrazione nel caso della grotta di Montespan in Alta Garonna, nella quale, all'inizio degli anni venti, Norbert Casteret scoprì un orso d'argilla, senza testa, che recava fra le zampe il cranio di un orsacchiotto. L'orso acefalo di Montespan è stato preso come una conferma delle teorie che supponevano l'esistenza di una magia legata alla caccia; sono state addirittura immaginate cerimonie di stregoneria. Tuttavia Michel Garcia del CNRS ha dimostrato recentemente che la galleria, che si era sempre ritenuta inviolata dal Maddaleniano, ossia da 12 000 anni fa, fu nuovamente visitata circa 5000 anni fa, durante il Calcolitico. Gli uomini di quest'epoca prelevarono argilla: sarebbero quindi stati loro a far sparire la testa della statua. Inoltre nella stessa galleria sono stati scoperti scheletri di orso delle caverne, fra cui quello di un piccolo. Questi ritrovamenti smontano quindi una bella storia a vantaggio di una realtà più prosaica.

Le osservazioni obiettive delle opere d'arte parietale ci permettono di intravvedere la psicologia dei loro autori. Una delle immagini più importanti della grotta Cosquer, che ho studiato insieme con Jean Courtin del CNRS di Marsiglia, è l'«uomo ucciso»: una figura umana sdraiata sul dorso, con le braccia alzate al cielo, trapassata da un enorme dardo con barbigli alle due estremità (*si veda l'illustrazione in alto a pagina 66*). Osservazioni realizzate lo scorso dicembre dimostrano che la figura è certamente umana, dato che il braccio termina con una mano le cui dita sono rappresentate da graffi sulla parete. L'«uomo ucciso» è stato trafitto da altri uomini; gli artisti di 19 000 anni fa hanno dunque raffigurato l'uccisione o il sacrificio di un essere umano. Nella grotta di Lascaux, in Dordogna, una pittura mostra un'altra scena di morte: un uomo cade all'indietro davanti a un bisonte ferito (si vedono i visceri che escono dal ventre) che lo carica a testa bassa (*si veda l'illustrazione in basso a pagina 66*). Queste immagini rappresentano due avvenimenti, sul cui significato è però difficile dire di più: stregoneria, magia propiziatoria per la caccia o narrazione di miti?

Prima della scoperta dell'«uomo ucciso» nella grotta Cosquer, si riteneva che questo soggetto fosse specifico della regione del Lot. Le grotte di Pech-Merle e di Cougnac, lontane fra loro solo 50 chilometri, contengono rappresentazioni analoghe. L'incisione della grotta Cosquer, che cronologicamente dista dalle altre circa 2000 anni, si trova a oltre 300 chilometri più a est; il tema dell'uccisione si diffuse dunque in un arco di tempo relativamente breve.

In che modo gli artisti del Paleolitico condividevano i loro temi? I dati di scavo dimostrano che all'epoca vi era scambio di oggetti: nella grotta del Mas d'Azil in Ariège, che si trova a oltre 200 chilometri dal mare, è stato rinvenuto in un livello di epoca maddaleniana un dente di capodoglio scolpito. Nella stessa regione si trovano conchiglie marine forate per farne pendenti, importate dalla costa mediterranea e da quella atlantica, nonché selce proveniente dalla Dordogna. Senza dubbio i temi artistici e religiosi potevano subire migrazioni analoghe.

Così a Lascaux, nel Lot, nei Pirenei e in due grotte spagnole si osservano segni claviformi, costituiti da una barra verticale di lunghezza variabile fra i 20 e i 40 centimetri e da un pallino posto lateralmente. Un identico motivo, comprendente cinque o sei segni claviformi posti a fianco a fianco e raggruppati in maniera analoga, è presente sia nella grotta di Fontanet nell'Ariège sia in quella di El Pindal nelle Asturie, fra Vigo e Santander, che dista 500 chilometri dalla prima.

La grotta del Placard nella Charente contiene una decina di figure geometriche stereotipate, formate da una spessa barra trasversale sormontata da una sorta di camino al centro e prolungata a ciascuna estremità da una sporgenza obliqua. Il significato esatto e il ruolo di questi segni ci sfuggono, ma essi sono noti anche nelle grotte di Cougnac e di Pech-Merle, situate a quasi 150 chilometri da quella del Placard. Il fatto che si sia potuto datarli con buona sicurezza in quest'ultimo sito (a oltre 20 000 anni fa) permette di considerare coeva almeno una parte delle figurazioni rinvenute nelle altre due cavità. Abbiamo dunque una testimonianza di contatti fra gruppi che erano separati da tutta la regione del Périgord, nella quale questi segni sono ancora sconosciuti.

Questa cartina riporta 12 grotte ornate della Francia, con le età più probabili delle opere. In territorio francese si conoscono attualmente 150 grotte ornate risalenti al Paleolitico, con forti concentrazioni nell'Ariège, in Dordogna, nel Lot e nell'Ardèche.

La datazione delle opere è pertanto indispensabile per l'interpretazione dei temi e lo studio dell'evoluzione culturale. L'analisi delle sovrapposizioni di figure e del contesto archeologico (livelli d'abitazione vicini alle pareti della caverna, arte mobile) e i confronti stilistici con opere di arte parietale ben datate trovano oggi un completamento nel metodo del carbonio 14, che fornisce risposte ben più precise.

La datazione preliminare di un sito si basa sempre su confronti stilistici. Le pitture della grotta Chauvet risalgono probabilmente a 18 000-20 000 anni fa, come le rappresentazioni figurative della grotta Cosquer. La prospettiva è resa nello stesso modo: il corpo dei bisonti è di profilo, ma le corna sono ruotate di 90 gradi e viste di fronte. Tuttavia questo tipo di stima è da prendere con cautela: non sappiamo esattamente per quanto tempo sia stato utilizzato un certo stile, né a quale velocità si trasmettesse su distanze tanto grandi.

Nella grotta Cosquer sono stati riconosciuti due periodi di frequentazione in base allo studio della sovrapposizione delle opere. Gli antichi abitanti hanno ricoperto tutte le pareti e le volte con impressioni di dita: laddove la superficie era sufficientemente molle, vi hanno fatto scorrere le mani disegnando volute e numerosi tratti paralleli, nei quali però non si distinguono figure deliberatamente costruite. Hanno realizzato inoltre 55 mani in negativo, molte con dita incomplete, servendosi della tecnica a «stampino» (cioè stendendo il colore intorno alla mano appoggiata sulla parete). Alle mani e alle impressioni di dita sono sovente sovrapposti animali dipinti o incisi, oltre a figure geometriche, rettangoli, zig-zag e segni a forma di zagaglia sugli animali. Poiché non si osserva mai una sovrapposizione inversa, ne abbiamo dedotto che le mani e le impressioni di dita sono precedenti alle figure di animali.

Per quanto riguarda il metodo del carbonio 14, attualmente mezzo milligrammo di carbonio è sufficiente per ottenere un dato cronologico. Rispetto agli altri metodi di datazione citati, è un progresso enorme: possiamo datare le opere d'arte stesse e, in una certa misura, scegliere quelle che vogliamo datare. Con il metodo del carbonio 14 si possono però analizzare solo le pitture realizzate con carbone di legna, e mezzo milligrammo di carbonio puro rappresenta a volte una notevole quantità di pigmento. Inoltre le date ottenute non sono che valori statistici: la probabilità che la data reale ricada in un intervallo di tempo di più o meno il 10 per cento intorno a una data media è del 67 per cento. Per passare al 95 per cento bisogna raddoppiare l'incertezza sulla data, e triplicarla per arrivare al 99 per cento. Inoltre datiamo solo il carbone che è servito a realizzare la pittura, non il gesto dell'artista. Se quest'ultimo avesse utilizzato carbone fossile, o pezzetti di carbone di legna abbandonati sul posto 10 000 anni prima, la data non avrebbe alcun senso. Per stabilire la cronologia precisa di un sito è dunque necessario ottenere numerose datazioni.

La grotta Cosquer sta per diventare il sito di arte rupestre meglio datato al mondo: disponiamo già di 12 date e una ulteriore serie di analisi è in via di realizzazione dopo i lavori di Courtin dell'autunno 1994. Le pareti molli e le fessure hanno trattenuto in vari punti frammenti di carbone: è relativamente facile prelevarne una quantità sufficiente senza rovinare le pitture. Sette date sono state ricavate direttamente dalle opere parietali e cinque da pezzetti di carbone raccolti a terra. Una mano in negativo è stata datata, con due prelievi, a circa 27 100 anni fa, e date vicine sono state ottenute per due frammenti di carbone. Per quanto riguarda le opere figurative, una testa di felino indica un'età di 19 200 anni, un cavallo 18 800 e un bisonte fra 18 000 e 18 500. Anche due pezzetti di carbone hanno fornito date che concordano con questo periodo di utilizzo della grotta. Abbiamo dunque

Jean Clottes/Sygma

A. Chêné/Centre Camille Jullian

Ciascuna grotta importante è caratterizzata da rappresentazioni di animali che non compaiono altrove. Nella grotta Chauvet, nell'Ardèche, si osservano a fianco a fianco un leopardo delle nevi e quella che potrebbe essere una iena (*in alto*). La grotta Cosquer, presso Marsiglia, contiene le sole raffigurazioni conosciute di pinguini (*in basso*).

A. Chêné/Centre Camille Jullian

Jean Vertu

Rilievo Michel Lorblanchet

Jean Vertu

Le rappresentazioni di esseri umani sono rare nell'arte rupestre paleolitica. L'incisione dell'«uomo ucciso» nella grotta Cosquer (*in alto*) è simile a quelle di Cougnac (*al centro a sinistra*) e di Pech-Merle (*al centro a destra*) nel Lot: la raffigurazione dell'uccisione di un essere umano da parte di suoi simili aveva dunque, 20 000 anni fa, una vasta distribuzione geografica. A Lascaux in Dordogna, la «scena del pozzo» (*in basso*) mostra invece quello che sembra un incidente di caccia. A Pech-Merle è visibile, sopra la figura, un segno geometrico che si trova anche nella grotta del Placard in Charente.

la conferma che la cavità è stata frequentata a due riprese, con un intervallo di 8000 anni.

Nella grotta di Cougnac nel Lot, studiata da Michel Lorblanchet del CNRS, l'immagine di una femmina di megacero (specie estinta di grande cervo) ha fornito due date separate da un notevole intervallo: 25 120 e 19 498 anni. Le date relative a un megacero maschio sono più coerenti: 22 750 e 23 615 anni. D'altra parte una serie di segni puntiformi realizzati con le dita ha indicato un'età di 14 300 anni, e una seconda serie, su un'altra zona di parete, ha fornito una data un po' diversa, 13 810 anni. Questi risultati attestano che il santuario rupestre è stato frequentato a più riprese, in un arco di tempo di almeno 10 000 anni, e sembrano indicare che i megaceri sono stati dipinti nel Perigordiano (ma forse le due figure non sono coeve), mentre i segni puntiformi sono stati realizzati nel Maddaleniano medio. La frequentazione della cavità in quest'ultima epoca è del resto confermata dall'età di 15 000 anni ottenuta per un metacarpo di renna saldato al terreno da incrostazioni di calcite; la datazione ottenuta per un elemento del contesto archeologico conferma in questo caso quelle ricavate direttamente dall'analisi delle opere parietali.

L'esistenza di un contesto archeologico permette una datazione indiretta delle opere: se gli artisti hanno soggiornato abbastanza a lungo nella grotta, vi hanno consumato i pasti, vi hanno lasciato i loro utensili, allora è possibile datare queste vestigia. Tuttavia, se il pavimento della caverna è duro o coperto di calcite, come quello della grotta Cosquer, non sussistono tracce. Il problema delle datazioni indirette è che spesso si rivela difficile stabilire un rapporto fra gli strati archeologici e la parete ornata. Ad Arcy-sur-Cure, nello Yonne, sono state ottenute datazioni di circa 28 000 anni per frammenti di carbone e di 24 500-27 000 anni per ossa combuste. Dominique Baffier del Laboratorio di etnologia preistorica del CNRS e Michel Girard del Centro di ricerche archeologiche del CNRS restano però molto prudenti sulla corrispondenza fra queste date e l'epoca di realizzazione delle pitture: il pavimento della caverna è stato verosimilmente sconvolto e i livelli archeologici potrebbero essersi mescolati.

Nel riparo sotto roccia del Colombier, a Vallon-Pont-d'Arc nell'Ardèche, i ricercatori sono stati più fortunati: dalla parete si è infatti staccata una scheggia di roccia con un magnifico stambecco inciso, di fattura analoga alle incisioni ancora in posto. Il suo rinvenimento in un contesto stratigrafico ha permesso di attribuire l'opera a uno degli strati sottostanti, che in base all'analisi con il metodo del carbonio 14 risalgono a 13 000-14 000 anni fa. Questa scoperta porta

A. Chêné/Centre Camille Jullian

Jean Vertu

Queste mani in negativo con le dita incomplete sono state dipinte con la tecnica dello «stampino»: la mano era appoggiata, con alcune dita ripiegate, alla parete della grotta, e l'artista vi soffiava intorno del pigmento. Le mani della grotta Cosquer (*a sinistra*) e di quella di Gargas nell'Ariège (*a destra*) sarebbero contemporanee e risalirebbero a circa 27 000 anni fa.

quindi ad arretrare notevolmente la cronologia del complesso del Colombier, che finora era stato sempre attribuito al Maddaleniano finale, ossia a poco più di 12 000 anni fa.

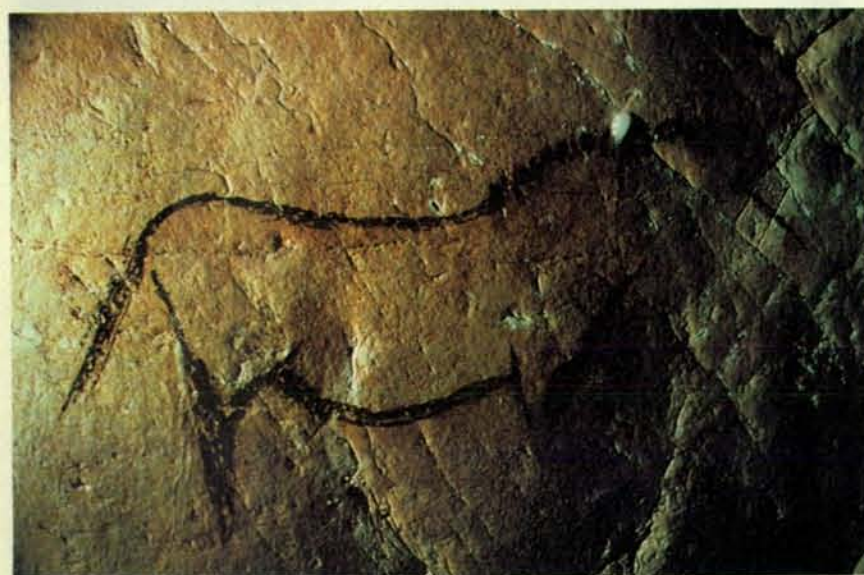
A Gargas nei Pirenei, una scheggia ossea conficcata in una fessura della parete, vicinissima alle mani in negativo, è stata datata a 27 000 anni fa circa. Non solo questa data e quella ottenuta per la mano in negativo della grotta Cosquer si confermano reciprocamente, ma la concordanza riguarda un soggetto che allo stato attuale delle conoscenze appare molto raro: in entrambi i casi abbiamo mani in negativo con dita incomplete (*si veda l'illustrazione in questa pagina*). Le date ottenute per i due siti sono le più antiche che si conoscano per questo tipo di figurazioni.

A Gargas non sappiamo se le mani sono state dipinte in un lungo arco di tempo oppure in un intervallo relativamente breve, concentrato intorno a 27 000 anni fa. In quest'ultimo caso, due serie di pollici identici in negativo circondati da colore nero porrebbero il problema di come interpretare una serie di sette pollici in negativo circondati di rosso che si trovano a Pech-Merle nel Lot. Questo motivo è troppo peculiare per riapparire casualmente a migliaia di anni di distanza; bisognerebbe dunque anticipare di 7000 anni rispetto alle date finora accettate le più antiche raffigurazioni di Pech-Merle.

Le analisi fisico-chimiche ci informano anche sulle tecniche artistiche impiegate dagli uomini del Paleolitico, in particolare sulla preparazione dei colori. Le prime ricerche in proposito condotte dall'abbé Breuil e le prime analisi realizzate all'inizio del secolo dal chimico Henri Moissan sono state nel frattempo notevolmente affinate.

Nella Sala nera della grotta di Niaux, in Ariège, Philippe Walter e Michel Menu del Laboratorio di ricerca dei musei di Francia hanno stabilito che in molti casi uno schizzo preliminare a carbone ha preceduto l'applicazione del pigmento: la composizione era dunque frutto di preparazione e matura riflessione. Questi schizzi esistono solo nelle opere più tarde, attribuite al Maddaleniano finale (12 000-13 000 anni fa). Non è stato trovato alcuno schizzo preliminare nelle gallerie più profonde della grotta: gli artisti evidentemente preferivano non soffermarsi in queste zone (al contrario di ciò che hanno fatto nella Sala nera), ma si limitavano ad andarvi in tutta fretta e a dipingere direttamente le figure di animali sulle pareti.

Prelievi sistematici eseguiti nella grotta di Niaux hanno rivelato la composizione delle pitture. Sono stati impiegati diversi pigmenti: ematite per il rosso, carbone oppure ossido di manganese per il nero. Oltre al pigmento e al legante, gli artisti incorporavano alla miscela una «carica»: mescolavano cioè un minerale finemente macinato al pigmento e al legante, in proporzioni tali da non alterare il colore. In questo modo essi non solo economizzavano sul pigmento, ma ottenevano una miscela più omogenea che aderiva meglio alla parete: la durevolezza delle opere era quindi accresciuta. Due minerali sono stati utilizzati in tempi successivi come carica: il feldspato potassico e la biotite. Analisi realizzate su oggetti dipinti datati in base al contesto archeologico dimostrano che il feldspato potassico venne impiegato durante il Maddaleniano medio (circa 14 000 anni fa) nelle caverne di Enlène e del Mas d'Azil in Ariège; la biotite rientra invece nella composizione del colore di oggetti del Maddaleniano finale rinvenuti nella Grotte de la Vache, che si trova a

Jean Clottes/Sygma

Pigmenti di composizione identica sono stati utilizzati nelle vicine grotte del Réseau Clastres e di Niaux, nell'Ariège. Le raffigurazioni della Sala nera di Niaux, come lo stambecco in alto, sono più dettagliate e più elaborate di quelle presenti nelle gallerie profonde della stessa grotta e nel Réseau Clastres (*in basso*): verosimilmente gli artisti rimanevano più a lungo nelle parti delle cavità vicine alla superficie.

poche centinaia di metri da Niaux. Tuttavia il piccolo numero di oggetti analizzati - meno di 20 - invita alla prudenza: non sappiamo per quanto tempo siano state utilizzate queste «ricette».

Analisi di pigmenti sono state anche effettuate nelle grotte di Pech-Merle, di Marcenac e soprattutto di Cougnac (tutte e tre nel Lot) da Lorblanchet. I megaceri neri di Cougnac sono stati tracciati con carboncino di pino o di ginepro, mentre il cavallo di Marcenac è stato disegnato con un «gessetto» di biossido di manganese. Sempre a Cougnac, un gruppo di figure è stato realizzato con un unico pigmento rosso, il che fa pensare all'esecuzione simultanea di una vera e propria composizione a fregio, e non a un accumulo di immagini avvenuto nel corso del tempo; viceversa, alcuni piccoli motivi laterali sono stati tracciati con un'ocra differente. Queste constatazioni hanno permesso di precisare le fasi di realizzazione del fregio. I pigmenti impiegati erano naturali e di origine locale, senza mescolanze.

Infine, per la prima volta in Europa, sono stati analizzati i leganti in campioni prelevati da parecchie grotte dell'Ariège. Nel Réseau Clastres, l'analisi ha dato risultati negativi: senza dubbio il legante era semplicemente acqua. L'impiego di questo liquido, facilmente ottenibile sul posto, concorderebbe del resto con il carattere rapido e poco elaborato delle raffigurazioni nelle gallerie profonde, dove gli artisti non rimanevano a lungo. Invece componenti organici sono stati individuati a Fontanet, Enlène e Trois-Frères. In questi due ultimi casi la sostanza, di origine vegetale, sarebbe la stessa, mentre a Fontanet il legante sarebbe di origine animale. Gli uomini del Maddaleniano avrebbero dunque utilizzato una vera e propria tecnica di pittura a olio.

I siti che conosciamo oggi, e quelli che forse scopriremo negli anni a venire, non rappresentano che un'infima parte delle grotte ornate dai nostri antenati. Potremo progredire nella conoscenza di quest'arte, ma non avremo mai una visione completa delle culture evolutesi per più di 25 000 anni in Europa. Il nostro principale obiettivo deve dunque essere la conservazione dei siti: fra 50 o 100 anni nuovi modi di pensiero, modelli esplicativi e tecniche di analisi daranno forse accesso a ulteriori informazioni. A questo scopo, i nostri discendenti dovranno avere a disposizione le grotte nelle migliori condizioni possibili, perché non sappiamo se avverranno mai altre scoperte eccezionali come quelle della grotta Cosquer o della grotta Chauvet.

Queste grotte saranno dunque per sempre tenute lontane dalla curiosità del pubblico, e gli stessi studiosi di preistoria vi accederanno raramente. La grotta Cosquer è chiusa per almeno due anni, il tempo occorrente per condurre a termine gli studi di climatologia preliminari al proseguimento delle ricerche. La grotta Chauvet sarà studiata con tecniche non distruttive; al momento non ne è previsto lo scavo. I suoi segreti ci attendono da 15 000 o 20 000 anni: potranno certamente pazientare qualche anno ancora.

JEAN CLOTTES è conservatore generale del patrimonio presso il Ministero della cultura e della francofonia. L'articolo qui pubblicato è la trascrizione di un'intervista.

L'art des cavernes: atlas des grottes ornées paléolithiques françaises, Ministère de la culture, Imprimerie nationale, Parigi, 1985.

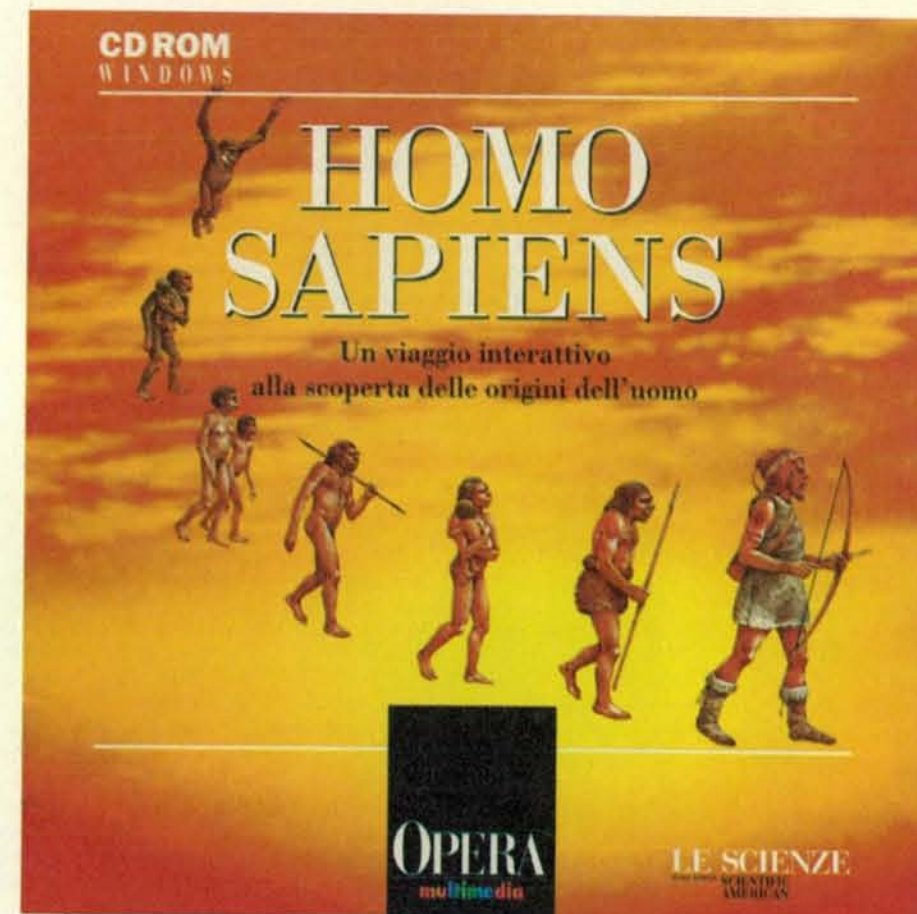
Les origines de l'homme, Bibliothèque Pour la Science, Parigi, 1989.

L'art pariétal paléolithique, a cura del Groupe de réflexion sur l'art pariétal paléolithique, Comité des travaux historiques et scientifiques, Parigi, 1993.

BURENHULT GÖRAN (a cura), *Les premiers hommes*, Bordas, Parigi, 1994.

CLOTTES JEAN e COURTIN JEAN, *La grotte Cosquer, peintures et gravures de la caverne engloutie*, éditions du Seuil, Parigi, 1994.

CLOTTES JEAN, *Les cavernes de Niaux, art magdalénien de l'Ariège*, éditions du Seuil, Parigi, 1995.

LEROI-GOURHAN ANDRÉ, *Préhistoire de l'art occidental*, éditions Mazenod, Parigi, 1995.

La scoperta dei raggi X

È passato un secolo da quando Wilhelm Conrad Röntgen ottenne per puro caso la prima immagine a raggi X

di Graham Farmelo

La cameriera aveva dovuto andare più volte a chiamarlo nel suo laboratorio. Quando Wilhelm Conrad Röntgen arrivò finalmente a tavola, dove lo attendeva la moglie, apparve distratto, mangiò poco e parlò ancora meno. Non appena la cena finì, si rimise subito al lavoro. Era l'8 novembre 1895. Da diversi mesi Röntgen stava studiando il comportamento dei raggi catodici, più tardi identificati da altri scienziati come elettroni. Sapeva che questi raggi, prodotti in grande abbondanza in uno speciale tubo a vuoto caricato con corrente ad alta tensione, riuscivano a penetrare solo pochi centimetri d'aria. Era rimasto perciò sbalordito vedendo, quella sera di venerdì, un'immagine ondeggiante, così lontana dal tubo che non poteva essere prodotta dai raggi catodici, ma che appariva solo quando essi erano presenti.

Röntgen si dedicò intensamente al problema per tutta la notte, e non udì neppure un anziano assistente di laboratorio che bussava alla porta, entrava e poi usciva. Per molti giorni mangiò e dormì nel laboratorio. (Peraltro era così intento a risolvere questo mistero che ignorò una regola fondamentale della sperimentazione: cominciò a prendere note soltanto una settimana più tardi.) Solo ripetendo molte volte l'esperimento, Röntgen si convinse che quell'immagine era generata da un nuovo tipo di raggi. Dato che non ne conosceva la natura, li chiamò raggi X (dove X stava per «sconosciuto»).

Parlò della scoperta solo al suo più caro amico, lo zoologo di Würzburg Theodor H. Boveri. «Ho scoperto qualcosa di interessante - gli disse - ma non so se le mie osservazioni siano corrette o meno.» La prima testimone dei suoi esperimenti fu la moglie Bertha, che egli chiamò in laboratorio la domenica prima di Natale. Qui ottenne una immagine che mostrava le ossa della mano sinistra di Bertha: la prima esposizione permanente ai raggi X di una parte del corpo umano (*si veda l'illustrazione in alto a sinistra nella finestra a pagina 72*).

La settimana dopo Natale Röntgen pubblicò una breve memoria, e nei primi giorni del nuovo anno i giornali di tutto il mondo cominciarono ad annunciare la scoperta. Mai in precedenza un risultato scientifico aveva provocato tanto scalpore sulla stampa popolare. Il finire del XIX secolo vide un gran numero di invenzioni certamente notevoli, ma il pubblico fu particolarmente affascinato dalla scoperta di Röntgen perché forniva un metodo per guardare all'interno del corpo umano senza doverlo dissezionare.

Il potenziale diagnostico dei raggi X fu compreso quasi immediatamente. Nel giro di un mese, medici europei e statunitensi li utilizzavano in una varietà di modi. Forse la più bizzarra fra le prime applicazioni fu il tentativo, descritto dal College of Physicians and Surgeons di New York, di proiettare gli schemi anatomici direttamente nel cervello degli studenti, per lasciarvi un'impressione molto più durevole di quanto fosse possibile ottenere con lo studio mnemonico. Dovevano passare circa 20 anni prima che gli scienziati determinassero la vera natura dei raggi X. Ciononostante, l'annuncio iniziale di Röntgen finì per essere uno dei più celebrati nella storia della fisica, sebbene diversi scienziati dell'epoca sostenessero che la sua scoperta fosse dovuta più alla fortuna che all'abilità.

I raggi catodici

Benché alla fine abbia raggiunto la fama come fisico, Röntgen aveva avuto inizialmente l'intenzione di diventare ingegnere. Era nato nel 1845 in una agiata famiglia di commercianti nella piccola città di Lennep, nella Germania nordoccidentale, e aveva trascorso la maggior parte dell'infanzia nei Paesi Bassi. All'età di 20 anni si trasferì a Zurigo e tre anni dopo si diplomò in ingegneria presso la Eidgenossische Technische Hochschule. Sebbene Röntgen non avesse seguito alcun corso di fisica sperimentale durante gli studi, decise di svolgere ricerche in questo settore dopo il diploma, persuaso in parte dal suo mentore, il professore di fisica August E. E. Kundt.

Dopo aver ricevuto il dottorato nel 1869, Röntgen ottenne una serie di incarichi come docente in varie università tedesche. In collaborazione con Kundt, compì attenti studi sul comportamento della materia; per esempio, fu il primo a dimostrare (usando un termometro fatto in casa) che è più facile riscaldare l'aria umida piuttosto che quella secca. Altri aspetti del suo lavoro portarono solide conferme alla teoria unificata dell'elettricità e del magnetismo proposta dopo il 1870 dal fisico scozzese James Clerk Maxwell.

Röntgen aveva 43 anni quando divenne professore di fisica e direttore dell'Istituto di fisica dell'Università di Würzburg, una prospera cittadina bavarese. Abitava con la moglie in un ampio appartamento al secondo piano dell'istituto, che comprendeva uno studio comunicante con un laboratorio privato. L'ottenimento di questo incarico probabilmente gli diede molta soddisfazione: 18 anni prima l'università non gli aveva permesso di candidarsi al concorso per la nomina a professore perché non aveva potuto presentare un *Abitur*, ossia un diploma di scuola superiore.

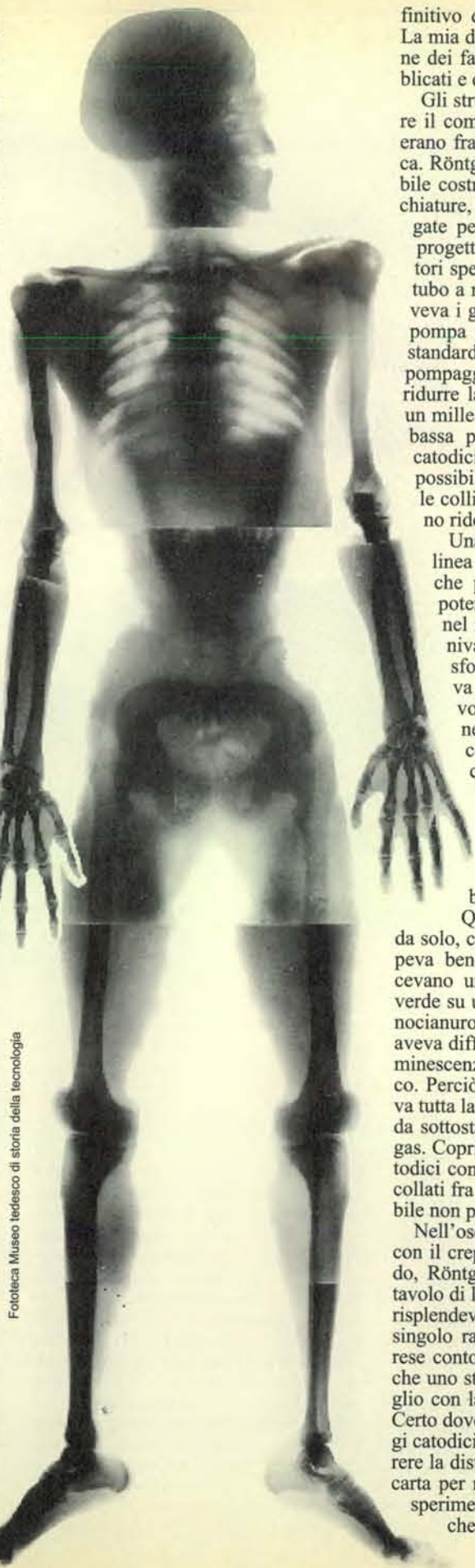
Röntgen dedicò molto tempo a ottenere spazi per il laboratorio, personale aggiuntivo e altre risorse per il neonato Dipartimento di fisica di Würzburg. Con i suoi sforzi, voleva renderlo fra i migliori della Germania. I suoi colleghi lo conoscevano come uno scienziato particolarmente ambizioso e meticoloso, straordinariamente al corrente dei più recenti sviluppi in tutti i settori della fisica. Sebbene fosse un uomo socievole, in tutta la sua carriera non parlò quasi mai del suo lavoro con un altro fisico.

Nel giugno 1894 cominciò a studiare i raggi catodici, a quel tempo un argomento di ricerca molto popolare. Era stato il fisico tedesco Eugen Goldstein dell'Università di Berlino a dare il nome a questi raggi 18 anni prima. Goldstein e diversi altri stabilirono che i raggi catodici erano carichi negativamente e si propagavano a velocità notevolmente inferiore a quella della luce. Ma restava un mistero fondamentale: mentre la maggior parte dei fisici britannici riteneva che questi raggi fossero particelle, i loro colleghi tedeschi pensavano che fossero perturbazioni di un etere onnipervasivo.

Probabilmente non sapremo mai quali motivazioni spinsero Röntgen a occuparsi dei raggi catodici. Le sue note di laboratorio indicano che egli voleva controllare i risultati ottenuti da due sperimentatori dell'Università di Bonn: l'allora da poco scomparso Heinrich R. Hertz, scopritore delle onde radio, e il suo assistente Philipp E. A. Lenard. Il lavoro di Röntgen fu interrotto in autunno dalla sua nomina a rettore della università. Alcuni scienziati si appassionano ai problemi dell'amministrazione di un istituto, ma non lui: nell'autunno dell'anno seguente era già tornato in laboratorio.

Il giorno della scoperta

Oggi un visitatore della stanza 119A del Politecnico di Würzburg si accorge immediatamente di come essa sia una parte speciale dell'edificio (*si veda l'illustrazione a pagina 76*). In questo locale dall'alto soffitto, di sei metri di lato, che guarda sui giardini botanici e sull'alberata Pleicher Ring (oggi Röntgen Ring), Röntgen compì la scoperta che doveva sbalordire il mondo. Sebbene questa stanza, ora divenuta un museo, non contenga le apparecchiature autentiche usate dallo scienziato, qui si respira la storia. Non fa meraviglia che il personale che accompagna i visitatori abbassi la voce in tono riverente nell'entrare in questo «santuario».

La notte dell'8 novembre 1895, insieme con le sette settimane di segretezza che la seguirono, è una ricca fonte di fascino e speculazioni. Röntgen stesso fece molto per stimolare questo interesse - senza dubbio non intenzionalmente - sia con il suo caratteristico comportamento reticente e imperscrutabile, sia perché non diede mai un resoconto definitivo di ciò che accadde realmente. La mia descrizione è quindi una versione dei fatti, ricavata dai resoconti pubblicati e dagli scarsi scritti di Röntgen.

Gli strumenti che egli usò per studiare il comportamento dei raggi catodici erano fra i migliori disponibili all'epoca. Röntgen preferiva per quanto possibile costruire da sé le proprie apparecchiature, ma gran parte di quelle impiegate per questi esperimenti era stata progettata e fornita da ottimi produttori specializzati. Per preparare il suo tubo a raggi catodici, Röntgen rimuoveva i gas e il vapore acqueo con una pompa a vuoto. Nella sua procedura standard, il tubo veniva sottoposto a pompaggio per tre o quattro giorni per ridurre la pressione interna a meno di un millesimo di quella atmosferica. La bassa pressione permetteva ai raggi catodici di passare il più liberamente possibile attraverso il tubo, in quanto le collisioni con molecole di gas erano ridotte al minimo.

Una bobina a induzione, simile in linea di principio al trasformatore che produce le alte differenze di potenziale per generare le scintille nel motore di un'automobile, forniva la corrente elettrica. Il trasformatore di Röntgen funzionava con un'alimentazione da 20 volt fornita da batterie situate nella cantina dell'istituto e la convertiva in singoli impulsi di circa 35 000 volt ciascuno. Venivano generati circa otto impulsi al secondo, ciascuno accompagnato da un forte crepitio dovuto alla scarica elettrica fra le estremità della bobina secondaria.

Quella sera Röntgen lavorava da solo, come faceva normalmente. Sapeva bene che i raggi catodici inducevano una caratteristica fluorescenza verde su uno schermo rivestito di platinocianuro di bario. Probabilmente però aveva difficoltà a distinguere questa luminescenza perché era un po' daltonico. Perciò oscurava la stanza e bloccava tutta la luce che proveniva dalla strada sottostante illuminata da lampioni a gas. Copriva anche il tubo per raggi catodici con pezzi di cartoncino nero, incollati fra loro in modo che la luce visibile non potesse sfuggire dal tubo.

Nell'oscurità totale del laboratorio, con il crepitio della bobina in sottofondo, Röntgen notò casualmente sul suo tavolo di lavoro un pezzetto di carta che risplendeva come se fosse colpito da un singolo raggio di luce. Questa luce, si rese conto, proveniva dalla lettera «A» che uno studente aveva tracciato sul foglio con la soluzione di platinocianuro. Certo dovette rimanere stupefatto: i raggi catodici non avrebbero potuto percorrere la distanza dal suo tubo al foglio di carta per rivelare la scritta. Ulteriori esperimenti gli permisero di appurare che in effetti il barlume era pro-

La prima immagine ai raggi X di un corpo umano fu eseguita da Ludwig Zehnder, uno degli assistenti di Röntgen, nell'agosto 1896. Questo mosaico di immagini mostra parti del corpo di persone diverse. I tempi di esposizione andavano da cinque a quindici minuti.

Fototeca Museo tedesco di storia della tecnologia

Le applicazioni attuali delle immagini a raggi X

Röntgen fu il pioniere di tre applicazioni chiave della radiografia X durante le sue prime indagini. Per prima cosa ottenne un'immagine a raggi X di una scatola per pesi chiusa nella quale si vedeva chiaramente il contenuto della scatola: un'anticipazione delle applicazioni nel settore della sicurezza che sono familiari a chi viaggia in aereo (*a destra*). Realizzò anche un'immagine a raggi X del suo fucile da caccia che mostrava un difetto interno (*in basso a sinistra*). I raggi X sono oggi comunemente usati nell'industria per rivelare difetti strutturali nascosti in svariati prodotti. Inoltre Röntgen ottenne un'immagine permanente a raggi X della mano sinistra di sua moglie, la prima radiografia di una parte del corpo umano (*in alto a sinistra*).

La prima radiografia di una parte del corpo umano.

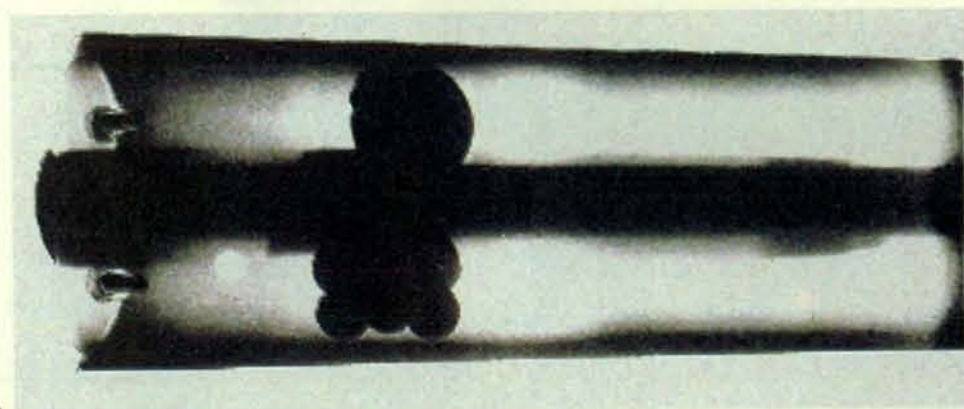
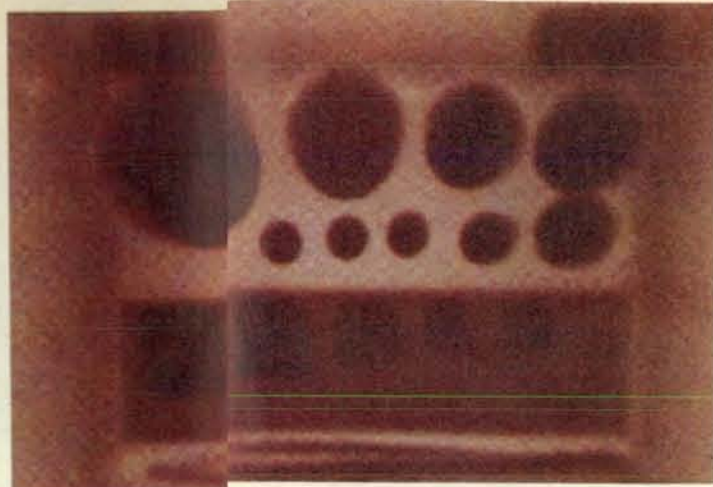
Fototeca Museo tedesco di storia della tecnologia

Il fucile da caccia di Röntgen.

Radiografia e fotografia convenzionale (*sotto*) di una scatola di legno.

Foto nella finestra (tranne dove indicato) e ritratto qui sotto: *100 Jahre Röntgenstrahlen: 1895-1995*, catalogo della mostra, Università di Würzburg, 1995

dotto da qualcosa che veniva emesso dal tubo e che era più penetrante dei raggi catodici. «Per caso», come poi affermò, Röntgen scoprì che questa emanazione passava liberamente attraverso un foglio di carta nera. Dimostrò poi che attraversava anche una carta da gioco. Un libro spesso, notò, gettava un'ombra netta sullo schermo, il che significava chiaramente che egli stava osservando raggi di qualche tipo, che si propagavano in linea retta. Quando cercò di stabilire fino a che punto i raggi penetrassero nei metalli ebbe forse la sorpresa maggiore: nel porre un pezzetto di piombo sulla loro traiettoria, vide non solo l'ombra scura dell'oggetto, ma anche un'ombra più debole con la forma del suo pollice e indice. Quest'ombra a sua volta ne conteneva un'altra che delineava le ossa delle dita.

Röntgen chiarì le proprietà dei raggi X con un classico esempio di lavoro sperimentale. Usando un magnete per deviare un fascio di raggi catodici in modo che colpisse il fianco del tubo a vuoto in zone differenti, si convinse - in pochi minuti - che i raggi X venivano emessi dal punto nel quale i raggi catodici toccavano la parete del tubo, e da nessun'altra parte del circuito. Dimostrò anche che le forze magnetiche non avevano alcun effetto sui raggi X, confermando che questi non possedevano carica elettrica.

Röntgen appurò successivamente che i raggi X, come i raggi catodici, potevano annerire una lastra fotografica. Ponendo oggetti fra la sorgente dei raggi e la lastra, riusciva a ottenere immagini permanenti a raggi X, sfruttando le diverse capacità dei materiali di trasmettere i raggi. Nel realizzare queste immagini, egli fu un pioniere in tre aree fondamentali della radiografia X. In primo luogo, un'immagine della sua cassetta di legno per i pesi, chiusa, rivelava chiaramente il contenuto, anticipando così le applicazioni di cui oggi si ha un esempio al *check-in* di tutti gli aeroporti.

In secondo luogo un'immagine a raggi X del suo fucile da caccia rivelò un difetto nell'interno del metallo: era la prima volta che un difetto strutturale nascosto veniva osservato senza distruggere l'oggetto. Infine, e questa fu l'applicazione più sorprendente, ottenne un'immagine a raggi X permanente della mano sinistra di sua moglie, che mostrava le ossa e gli anelli da lei indossati. Per avere questo risultato, Bertha dovette tenere la mano immobile sulla lastra per circa 15 minuti, e subì quindi una dose di raggi X che superava pericolosamente i limiti prescritti dai moderni standard di sicurezza. Sono questi i rischi che i pionieri devono inconsapevolmente fronteggiare.

Röntgen confrontò attentamente le proprietà dei raggi X con quelle della luce visibile. Per quanto entrambi i tipi di radiazione fossero elettricamente neutri e proiettassero ombre nette, egli trovò che per altri aspetti vi erano notevoli differenze. Non riuscì infatti a riflettere i raggi X né a rifrangerli (non poteva variarne la direzione facendoli passare da un mezzo a un altro, per esempio facendo loro attraversare un prisma di vetro). Inoltre non trovò alcuna indizio che potessero essere diffratti (i raggi X non curvano intorno a ostacoli).

Le somiglianze fra i raggi X e la luce condussero tuttavia Röntgen a ipotizzare che fossero in qualche modo correlati. Secondo la teoria avanzata da Maxwell nel 1873, la luce è un'onda elettromagnetica che si propaga nell'etere, avente componenti elettrica e magnetica, orientate ortogonalmente l'una rispetto all'altra, che vibrano perpendicolarmente alla direzione di moto dell'onda. Röntgen ipotizzò che i raggi X fossero vibrazioni dell'etere aventi la stessa direzione di moto dei raggi. Questa speculazione - che poi si rivelò errata - concludeva la sua memoria, *Su un nuovo tipo di raggi, comunicazione preliminare,* un capolavoro di fisica sperimentale e di concisione espositiva. [Una traduzione italiana del lavoro è contenuta nel volume *I cacciatori d'ombre* di Pino Donizetti, Mondadori, Milano 1978.] Il 28 dicembre 1895, consegnò il manoscritto di 10 pagine al segretario della Società di fisica medica di Würzburg con l'insolita richiesta che venisse pubblicato rapidamente. Il giorno di Capodanno, dopo aver inviato copie del manoscritto e alcune fotografie a diversi fisici europei, disse alla moglie: «Ora me la vedrò bella».

L'indomani della scoperta

«Nel giro di qualche giorno ero disgustato dall'intera faccenda. Non riconoscevo più il mio lavoro in quello che veniva detto» scrisse Röntgen a un ex assistente circa un mese dopo che si era diffusa la notizia della scoperta. Era furioso e sconvolto per i primi articoli dei giornali, che presentavano le sue notevoli fotografie come se fossero la parte di gran lunga più importante dell'esperimento. Röntgen, da parte sua, era molto più interessato a scoprire quali fossero la vera natura e le proprietà dei raggi X.

Il primo articolo di giornale apparve domenica 5 gennaio sulla «Presse» di Vienna, e il 16 gennaio la notizia era arrivata al «New York Times». La maggior parte degli scienziati lesse questi articoli prima che divenissero disponibili traduzioni della memoria originale; non sorprende quindi che parecchi di essi inizialmente non vi prestassero fede. Fra gli scettici vi fu Lord Kelvin dell'Università di Glasgow, considerato all'epoca il maggiore scienziato vivente. Kelvin dapprima ritenne che l'annuncio fosse uno scherzo (ma presto cambiò idea).

La sorprendente capacità dei raggi X di penetrare la materia stimolò l'immaginazione di molti vignettisti, e ciò vale a testimoniare come a livello popolare fossero diffusi parecchi equivoci al proposito. Inoltre la scoperta ispirò un buon numero di imbroglioni. Una società di Londra, per esempio, pubblicizzò la sua «biancheria a prova di raggi X», mentre in Francia i membri di una setta religiosa tentarono di «fotografare l'anima». Un agricoltore dello Iowa affermò di aver usato i nuovi raggi per trasformare un pezzo di metallo del valore di 13 centesimi in una massa d'oro del valore di 153 dollari.

Ingegneri e fotografi furono in generale ancora più rapidi dei medici nell'intuire le potenzialità dei dispositivi a raggi X. Come commentò la rivista statunitense «Electrical Engineer» nel marzo 1896, «si può affermare senza tema di smentite che probabilmente tutti coloro che dispongono di un tubo a vuoto e di una bobina a induzione hanno cercato di ripetere l'esperimento del professor Röntgen». Alla fine dello stesso anno erano in funzione centinaia di rudimentali apparecchi per raggi X. I primi tentativi di radiografie furono casuali perché gli sperimentatori potevano solo indovinare i tempi di esposizione necessari per produrre immagini nitide. Dal 1899, numerosi medici iniziarono a sperimentare i raggi X per curare cancro, tubercolosi e svariate infiammazioni. I loro successi furono alterni e alcu-

Wilhelm Conrad Röntgen era uno sperimentatore meticoloso e solitario che raramente parlava del suo lavoro con altri fisici. La sua inattesa scoperta dei raggi X fece grande sensazione sulla stampa mondiale e gli procurò una celebrità che egli non desiderava affatto.

ni pazienti e medici subirono gravi ustioni da radiazioni.

Nel frattempo Röntgen proseguiva le sue ricerche cercando di destreggiarsi nel ruolo, per lui inconsueto, di celebrità internazionale. Non rispose alla maggior parte delle lettere che gli arrivavano e rifiutò tutti gli inviti a conferenze tranne due. Il primo veniva dalla Corte imperiale a Berlino ed era una richiesta di illustrare la sua scoperta il 13 gennaio all'imperatore Guglielmo II, che Röntgen ammirava per la sua attività politica e per il suo interesse verso la scienza. Dopo il successo della dimostrazione, l'imperatore insignì Röntgen dell'Ordine prussiano della Corona (di Seconda Classe) e incaricò prontamente altri tre scienziati di studiare le potenzialità militari della scoperta. Röntgen sapeva di questo lavoro, ma non vi collaborò né cercò di intralciarlo.

Tenne una seconda conferenza davanti al corpo docente e agli studenti di Würzburg, ad alti ufficiali dell'esercito e ad autorità locali. Parlando con calma e con spiccato accento olandese, Röntgen presentò i suoi risultati e affascinò il pubblico producendo sul posto un'immagine a raggi X della mano di un suo amico e collega. Questi, E. Albert von Kölliker, uno dei pionieri dell'istologia, chiese al pubblico tre acclamazioni e propose che i nuovi raggi fossero da quel momento chiamati raggi Röntgen. Contro la volontà di Röntgen stesso, il nome venne presto adottato in tutti i paesi di lingua tedesca, dove è in uso ancora oggi.

Il primo Nobel

Nonostante le inopportune distrazioni dovute alla celebrità, Röntgen preparò altre due memorie sui raggi X, una nel marzo 1896 e l'altra un anno dopo. In questi brevi lavori, scritti nello stesso stile conciso del primo, egli riferì gli effetti della esposizione di diversi materiali ai raggi X. Per il resto della vita non scrisse più nulla su questo argomento, sebbene continuasse a condurre ricerche sulle proprietà dei raggi X.

Poco dopo la scoperta dei raggi X, Alfred Nobel redasse le sue ultime volontà, e nel testamento lasciò fondi per l'assegnazione del premio che porta il suo nome. Nel 1901 il primo premio Nobel per la fisica fu assegnato a Röntgen. Il comitato per l'assegnazione votò a grandissima maggioranza in suo favore, sebbene la concorrenza fosse eccezionale. Otto degli altri 11 candidati furono insigniti del premio negli anni successivi.

Röntgen ricevette l'onorificenza dal principe ereditario di Svezia e pronunciò un eloquente discorso di ringraziamento durante il banchetto, ma il giorno successivo ripartì, rinunciando per timidezza a tenere la Conferenza Nobel. Sebbene avesse da poco accettato un incarico all'Università di Monaco, dove rimase per il resto della sua carriera accademica, lasciò il denaro del premio al Dipartimento di fisica di Würzburg per fornire sostegno finanziario agli studenti (gli interessi di questi fondi vengono tuttora usati per lo stesso scopo).

Entro pochi mesi dalla scoperta di Röntgen furono proposte diverse teorie concorrenti sulla natura dei raggi X. Due di esse erano particolarmente in auge. Una descriveva i raggi X come impulsi di energia elettromagnetica emessi quando i raggi catodici urtavano improvvisamente la materia e si bloccavano. Secondo l'altra teoria, i raggi X erano semplicemente un tipo di onda elettromagnetica, simile alla luce visibile ma con una lunghezza d'onda molto più piccola. Fu solo nel 1912 che, da un esperimento effettuato a Monaco, emersero importanti elementi a favore della seconda teoria.

Max T. F. von Laue dell'Istituto di fisica teorica propose brillantemente che, se la teoria ondulatoria fosse stata corretta, i fasci di raggi X avrebbero dovuto essere diffratti dai cristalli, che erano comunemente (e correttamente) ritenuti strutture di atomi regolarmente spaziati. Von Laue comunicò questa idea a due studenti, Walter Friedrich e Paul Knipping, i quali ben presto ottennero alcuni sorprendenti diffrattogrammi che indicavano come un fascio di raggi X fosse stato effettivamente diffratto da cristalli di solfuro di zinco.

Contrariamente a quanto si crede di solito, i risultati di Friedrich e Knipping non diedero un colpo rapido e mortale alla teoria rivale degli impulsi. Alcuni mesi dopo l'annuncio delle loro scoperte, Hendrik A. Lorentz dell'Università di Leida dimostrò, con un ragionamento teorico raffinatissimo, che era possibile spiegare quei risultati anche ricorrendo alla teoria degli impulsi. Nessun singo-

Per gentile concessione del Science Museum, Londra

Si ritiene che questo strumento di costruzione artigianale sia la più antica macchina esistente per produrre immagini a raggi X. Il medico inglese John Reynolds e suo figlio Russell cominciarono a costruirla poco dopo aver letto della scoperta di Röntgen nel «London Standard» del 7 gennaio 1896. La bobina di induzione riceveva corrente elettrica da sette batterie ad acido cromico della capacità di circa un litro. I Reynolds avvolsero la bobina a mano, il che non fu un lavoro da poco: la bobina secondaria conteneva oltre 20 chilometri di filo. L'alta tensione prodotta dalla bobina andava poi al tubo per raggi X, che era fissato al piedistallo di mogano.

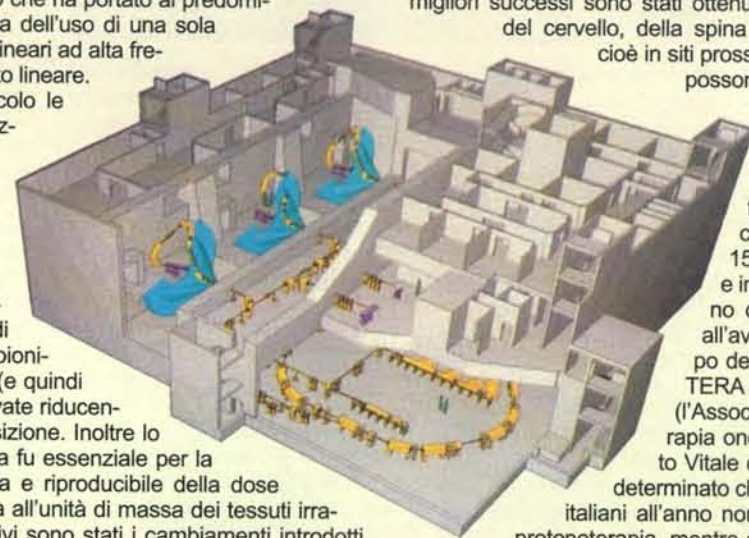
I raggi X e le moderne frontiere della radioterapia

In Italia le prime applicazioni diagnostiche dei raggi X furono tentate molto presto. Alessandro Pascolini - preparando la mostra *Atomi per la salute* inaugurata a Stresa presso il collegio Rosmini l'8 novembre scorso dall'Istituto scientifico europeo presieduto da Giampiero Tosi - ha trovato un documento che testimonia come i nuovi raggi furono usati a Padova nel gennaio del 1896. Inoltre, già pochi mesi dopo la scoperta di Röntgen, i raggi X furono utilizzati a Vienna nel tentativo di frenare la crescita incontrollata delle cellule tumorali.

Da allora la diffusione di questa terapia per il controllo loco-regionale dei tumori è stata determinata dallo sviluppo degli strumenti che - per motivi che nulla hanno a che fare con la lotta contro il cancro - hanno permesso di accelerare elettroni a energie sempre più alte. L'energia massima dei raggi X così accuratamente studiati a Würzburg nei mesi di novembre e dicembre 1895 era dell'ordine dei 25 chiloelettronvolt (keV). Oggi in molti ospedali sono trattati pazienti con fasci di raggi X di energia mille volte maggiore: molti moderni acceleratori lineari medici accelerano infatti elettroni fino a 25 milioni di elettronvolt (MeV), anche se spesso sono impiegati acceleratori da circa 5 MeV. Il cammino che ha portato al predominio in terapia oncologica dell'uso di una sola tecnica, gli acceleratori lineari ad alta frequenza, non è stato certo lineare.

Per circa mezzo secolo le sorgenti di raggi X utilizzate in terapia sono state versioni perfezionate di quelle usate da Röntgen cento anni fa. Con migliori trasformatori ad alta tensione, gli elettroni furono accelerati fino a centinaia di keV, e il filamento termoionico permise di produrre (e quindi accelerare) correnti elevate riducendo così i tempi di esposizione. Inoltre lo sviluppo della dosimetria fu essenziale per la determinazione accurata e riproducibile della dose (cioè dell'energia ceduta all'unità di massa dei tessuti irradiati). Molto più innovativi sono stati i cambiamenti introdotti nel modo di somministrare la dose, conseguenza della migliore comprensione dell'interazione dei raggi X con i tessuti. Il cambiamento più importante avvenne negli anni trenta allorché fu scoperto che, somministrando la dose in una trentina di sessioni giornaliere, si ottengono risultati migliori, essenzialmente perché la sensibilità delle cellule alla radiazione dipende dalla fase del loro ciclo: solo colpendo le cellule tumorali a stadi diversi di sviluppo è possibile garantirne la morte con quella probabilità di una parte su un miliardo necessaria per controllare un tumore.

A partire dagli anni cinquanta hanno fatto la loro comparsa nei centri di radioterapia i primi prodotti dei più recenti sviluppi della fisica nucleare: le sorgenti radioattive artificiali e gli acceleratori di particelle. Rimanendo nel campo della teleterapia - cioè della terapia con sorgenti esterne al corpo del paziente - per qualche decennio si sono moltiplicate le «bombe» al cobalto, un radionuclide che emette raggi gamma di 1 MeV circa di energia. Oggi sia queste sorgenti che gli acceleratori circolari detti «betatroni» non vengono praticamente più acquistati e, come si è detto, dominano i «linac», acceleratori lineari lunghi 1-2 metri che ruotano facilmente intorno al lettino del paziente e permettono di irradiare il tumore a partire da una direzione qualsiasi. È infatti necessario usare diverse direzioni («campi») perché l'assorbimento dei raggi X nei tessuti è circa esponenziale; il massimo della dose è poco al di sotto della pelle e a una quindicina di centimetri la dose è solo il 50 per cento della dose massima. Per risparmiare quindi i tessuti sani attraversati dando la dose massima al tumore profondo è necessario investire il tumore da direzioni diverse. Proprio per questo la prima frontiera odierna della terapia con raggi X di alta energia è l'uso di molti campi (fino a una dozzina) in quella che si chiama la «terapia conformazionale»; l'Istituto scientifico europeo ha organizzato sul Lago Maggiore, in occasione del centenario della scoperta dei raggi X, il primo seminario italiano di formazione su questo argomento.

La seconda frontiera della radioterapia porta il nome un po' esotico di «adroterapia», da adroni, le particelle nucleari composte di quark, tra le quali si annoverano protoni, neutroni e nuclei atomici. Queste particelle - di massa migliaia di volte più elevata di quella di un elettrone - accelerate a molte centinaia di MeV, penetrando nella materia lasciano il massimo della dose in profondità e permettono quindi una terapia dei tumori solidi di precisione millimetrica, anche se si usano una o due direzioni di incidenza. Per ragioni fisiche, quindi, le dosi date ai tessuti sani che circondano il tumore sono minori di quelle della migliore terapia conformazionale. Con fasci di protoni sono stati trattati nel mondo circa 20 000 pazienti; i migliori successi sono stati ottenuti in patologie dell'occhio, del cervello, della spina dorsale e della prostata, cioè in siti prossimi a organi critici che non possono essere irradiati. In Italia da quattro anni la Fondazione TERA (Fondazione per adroterapia oncologica), ente morale creato da Giampiero Tosi e da chi scrive, ha raccolto circa 150 medici, fisici, ingegneri e informatici che si propongono di portare il nostro paese all'avanguardia in questo campo dell'oncologia. Nel quadro di TERA i radioterapisti dell'AIRO (l'Associazione italiana di radioterapia oncologica presieduta da Vito Vitale dell'IST di Genova) hanno determinato che circa 500 nuovi pazienti italiani all'anno non hanno altra cura che la protonoterapia, mentre altri 4000 se ne avvantaggerebbero. Ciò corrisponde a circa il 5 per cento dei pazienti oggi trattati con i raggi X; fasci di ioni carbonio, oggi utilizzati solo in Giappone, permettono il trattamento dei circa 10 000 tumori all'anno che sono «radioresistenti» sia ai raggi X che ai protoni.

L'edificio del Centro nazionale di adroterapia oncologica coprirà una superficie di 3000 metri quadrati e sarà interrato. Protoni e ioni carbonio saranno accelerati da un sincrotrone di 20 metri di diametro e 1000 pazienti all'anno saranno trattati per 20 sessioni ognuno in 4 sale per protoni e una per ioni.

Per ottenere i suoi scopi la Fondazione TERA ha terminato lo studio di fattibilità di un Centro nazionale di adroterapia oncologica, che nel 2000-2001 accelererà sia protoni che ioni carbonio e, unico in Europa, sarà all'altezza dei due centri ospedalieri americani e dei tre giapponesi che saranno allora in funzione. Inoltre la Fondazione, in collaborazione con l'Istituto superiore di sanità (ISS), l'INFN e l'ENEA, ha terminato gli studi di fattibilità di quattro tipi diversi di acceleratori «compatti» per protoni. L'ISS ha un progetto, finanziato per 6 miliardi, di scelta di uno degli acceleratori «compatti» e di costruzione con l'industria nazionale di un prototipo; il disegno di dettaglio è appena iniziato.

Ugo Amaldi
CERN, Ginevra, e Università di Milano

La stanza 119A del Politecnico di Würzburg, oggi museo, è il luogo dove Röntgen scoprì i raggi X nel tardo pomeriggio di venerdì 8 novembre 1895. Può sorprendere che la scoperta non sia stata fatta prima: centinaia di fisici all'epoca eseguivano esperimenti simili al lavoro di Röntgen.

Graham Farmelo

lo esperimento poteva invalidare questa teoria, e il consenso a favore del modello ondulatorio emerse solo gradualmente.

Lo storico della scienza Arne Hessenbruch dell'Università di Cambridge ha recentemente fornito importanti elementi per la comprensione dei fattori che condussero a questo consenso. Egli ha fatto notare che l'influente e fiorente comunità dei medici radiologi aveva cominciato già dal 1907 a riferirsi comunemente ai raggi X trattandoli come onde elettromagnetiche, e che gli studiosi di questo settore erano quasi tutti sostenitori della teoria ondulatoria. La loro accettazione forse prematura di questa teoria contribuì fortemente a rendere marginale la teoria degli impulsi.

Inoltre la teoria ondulatoria era riuscita costantemente a dare spiegazioni semplici delle osservazioni compiute da Röntgen nel suo laboratorio a Würzburg. Quando il fascio di raggi catodici (elettroni) carichi negativamente colpiva il lato del tubo a vuoto, essi rallentavano rapidamente e perdevano in gran parte o del tutto la loro energia cinetica. Come accade per tutte le particelle cariche, un elettrone che accelera o decelera emette radiazioni elettromagnetiche. Era questa radiazione, in forma di raggi X profondamente penetranti, a essere stata rivelata da Röntgen.

Fino alla morte, avvenuta nel 1923 a causa di un carcinoma intestinale, Röntgen continuò a sfruttare la propria fama per sostenere la causa della fisica in Germania. Fu in parte grazie alla sua influenza presso l'imperatore Guglielmo II che il Museo tedesco di storia della tecnologia fu costruito a Monaco anziché a Berlino come era stato stabilito in origine. Il più recente biografo di Röntgen, la giornalista Angelika Schedel, ha trovato cospicue testimonianze che indicano come egli apprezzasse l'attività politica molto più di quanto generalmente si creda.

Sebbene Röntgen sia di solito ritratto come un uomo inavvicinabile e introverso, la Schedel fa notare che probabilmente egli acquisì questa reputazione a causa delle sue prolungate assenze dall'università nel periodo in cui si dedicò all'assistenza della moglie, la quale morì nel 1919 a causa di un'insufficienza renale. Sconvolto dal dolore, egli si ritirò in pensione l'anno seguente.

La cosa forse più sorprendente riguardo alla scoperta dei raggi X è che essa non sia stata fatta prima. Molti altri scienziati avevano a disposizione le attrezzature per compiere le necessarie osservazioni e gli effetti dei raggi X erano certamente stati osservati, se non riconosciuti, assai prima del 1895. Intorno al 1880, infatti, William Crookes dell'Università di Londra aveva osservato che le lastre fotografiche collocate vicino ai tubi per raggi catodici erano spesso annebbiate e ne aveva persino rimandate alcune al fabbricante lamentando che fossero difettose.

Parecchi scienziati sostennero di aver scoperto i raggi X prima di Röntgen e altri considerarono il suo lavoro come un semplice colpo di fortuna. Il più aspro fra i detrattori fu Lenard, l'assistente di Hertz, il quale riteneva che Röntgen avrebbe dovuto riconoscere il suo lavoro. Poco prima della scoperta dei raggi X, Lenard aveva progettato un tubo per raggi catodici con speciali modifiche, e Röntgen se ne era procurato un esemplare da lui. Sebbene il tubo non fosse stato usato nell'esperimento decisivo, Lenard osservò polemicamente: «Se nella scoperta dei raggi X Röntgen è stato la levatrice, io sono stato la madre». A questi e ad altri commenti che tendevano a sminuirlo Röntgen non diede mai risposta.

Non c'è dubbio che Röntgen fosse in una situazione ottimale per compiere la sua scoperta. Possedeva le apparecchiature più moderne e a esse aggiungeva una prodigiosa abilità sperimentale e conoscenze profonde. Fu dunque fortunato? La risposta deve essere sì, se si può considerare fortuna ciò che accade quando una preparazione straordinaria si unisce a un'opportunità altrettanto straordinaria.

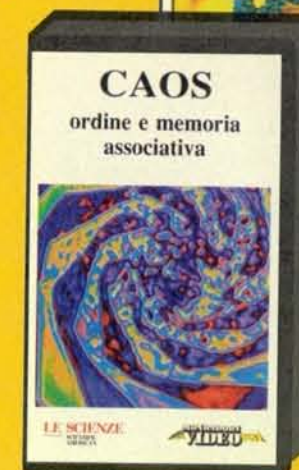
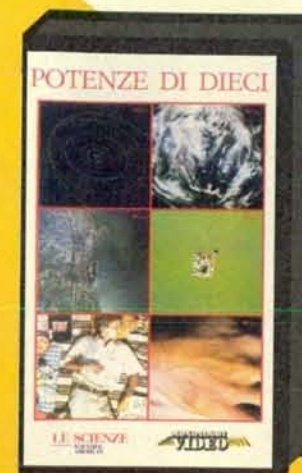
GRAHAM FARMELO dirige i programmi dello Science Museum di Londra dove è giunto nel 1990, dopo un anno sabbatico presso la Northeastern University, presso la quale è professore associato di fisica. Dal 1977 al 1990 è stato lettore in fisica alla Open University. I suoi interessi di ricerca comprendono la diffusione delle particelle subnucleari, il caos quantistico e la diffusione classica.

GLASSER OTTO, *Wilhelm Conrad Röntgen and the Early History of the Roentgen Rays*, Norman Publishing, 1993 (ristampa dell'edizione 1934).

NITSKE W. ROBERT, *The Life of Wilhelm Conrad Röntgen, Discoverer of the X-ray*, University of Arizona Press, 1971.

PAIS ABRAHAM, *New Kinds of Rays* in *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*, Oxford University Press, 1986.

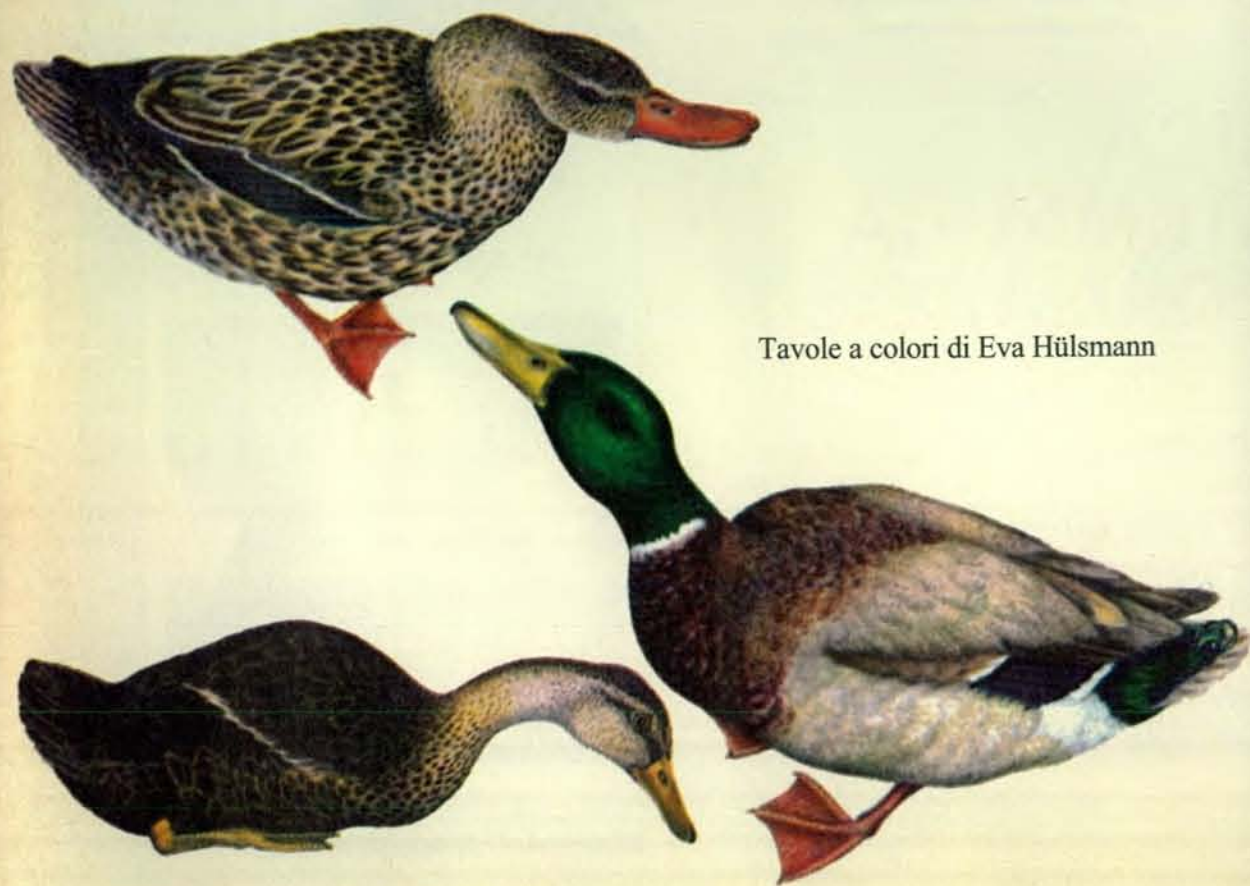
CAUFIELD CATHERINE, *Multiple Exposures: Chronicles of the Radiation Age*, University of Chicago Press, 1990.

HESSENBRUCH ARNE, *Early Medical Applications of X-rays* in «Physics Education», 30, n. 6, novembre 1995.

Dimmi come ti vesti...

Sapete riconoscere questi tre germani? La femmina adulta (*in alto*) indossa un sobrio piumaggio vivacizzato da una banda (in termine tecnico specchio) blu brillante che sottolinea le ali. Becco e zampe arancioni danno un tocco di colore all'insieme. Molto più vistoso, come in tutte le specie poligame, il piumaggio del maschio che dovrebbe avere la funzione di attirare la femmina. Dovrebbe, ho scritto, perché ho visto con i miei occhi usare violenza di gruppo su un'anitra che sembrava non avere alcuna voce in capitolo nella scelta del partner. La livrea del maschio adulto è comunque molto bella soprattutto per il piumaggio verde cangiante che copre il capo e il collo e che è delimitato da un netto collarino bianco. (In realtà si possono anche vedere maschi dal piumaggio molto meno vivace, riconoscibili quasi solo per il ricciolo che sovrasta la coda. Sono quelli che si sono già accoppiati e che subiscono la muta cercando di farsi notare il meno possibile.)

Non ancora adulto, ma senza più la grazia del pulcino, il giovane in basso a sinistra non ha ancora caratteristiche che lo possano far attribuire all'uno o all'altro sesso. Il piumaggio uniformemente picchiettato lo mimetizza abbastanza bene soprattutto nei canneti e lo fa passare relativamente inosservato nel gruppo: la strategia migliore in attesa di crescere.

Forme e colori del piumaggio dei germani sono stati compendiati nella grande tavola a fronte che fa immediatamente pensare a questa anitra selvatica pur senza rappresentare specificamente alcun particolare della livrea. *(ag)*

Tavole a colori di Eva Hülsmann

La scienza dei giochi di destrezza

Lo studio dell'abilità nell'eseguire giochi con palle e anelli chiarisce vari aspetti della coordinazione umana e ha applicazioni in robotica e matematica

di Peter J. Beek e Arthur Lewbel

Alla televisione o in un circo, o magari in un boulevard parigino, chiunque è rimasto ammirato davanti all'abilità di qualche giocoliere capace di lanciare e riprendere al volo palle, birilli, anelli, talora addirittura coltelli dalla lama affilata. Ma il gioco di destrezza non serve solo per il semplice intrattenimento. È abbastanza complesso da avere proprietà interessanti e nello stesso tempo è abbastanza semplice perché sia possibile costruire modelli di queste proprietà. È quindi un contesto utile per l'analisi di problemi relativi ad altri e più complessi campi; sono tre, in particolare, i settori di ricerca che ne hanno tratto i maggiori benefici. Uno è lo studio del movimento umano e della coordinazione degli arti; un altro è la robotica e la costruzione di «macchine giocoliere», utili per la messa a punto e l'applicazione di principi del controllo meccanico in tempo reale; il terzo è la matematica: gli schemi relativi ai giochi di destrezza hanno proprietà numeriche sorprendenti.

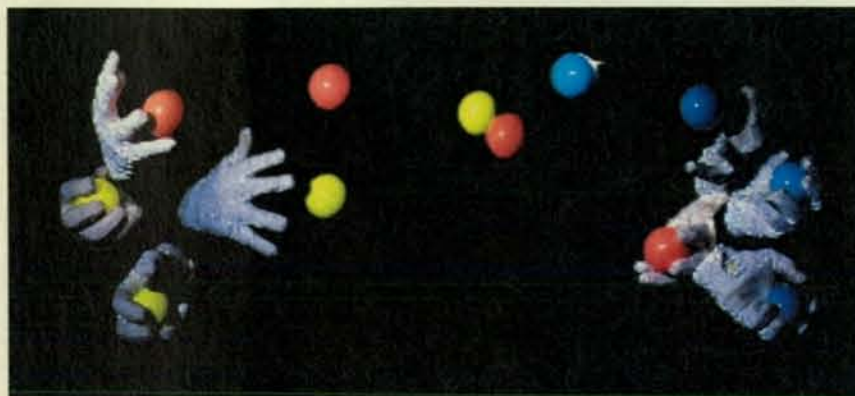
L'arte dei giocolieri, o giocoleria, è una tradizione antica: la prima rappresentazione nota si trova in Egitto, nella tomba 15 di Beni Hassan, appartenente a un ignoto principe del Medio Regno, periodo compreso tra il 1994 e il 1781 a.C.; il primo studio scientifico conosciuto risale però al 1903, quando Edgar James Swift pubblicò un articolo sull'«American Journal of Psychology» nel quale forniva dati sulla velocità con cui alcuni studenti imparavano a lanciare in aria due palle con una mano. Negli anni quaranta si iniziò a utilizzare il calcolatore per studiare le traiettorie di oggetti lanciati, e venne fondata la International Jugglers Association. Gli anni cinquanta e sessanta videro poche e saltuarie applicazioni, soprattutto a opera di seguaci di Swift che sfruttavano i giochi di destrezza per valutare l'apprendimento di abilità sensomotorie.

Infine, negli anni settanta, i giochi di destrezza iniziarono a essere studiati per se stessi. Al Massachusetts Institute of Technology, Claude E. Shannon inventò macchine giocoliere e formulò il teorema del gioco di destrezza, in cui si esprime la relazione tra posizione delle palle e azione delle mani. Seymour A. Papert e altri ricercatori del Progetto MAC (che in seguito divenne l'Artificial Intelligence Laboratory del MIT) studiarono il modo in cui si impara a padroneggiare l'arte della giocoleria, e venne fondato il club di giocolieri del MIT, una delle più vecchie organizzazioni di giocolieri dilettanti ancora esistenti. Negli anni ottanta nacque la matematica del gioco di destrezza e diversi studiosi elaborarono un particolare tipo di notazione per indicare gli esercizi (*si veda la finestra a pagina 82*).

Con tre palle, molti neofiti cercano di eseguire la figura «a doccia» - in cui la traiettoria delle palle forma un cerchio - anche se quella «a cascata» - in cui le mani si alternano nel lanciarsi le palle, producendo una traiettoria a otto - è molto più facile. Spesso ci vogliono solo poche ore o giorni per imparare a lanciare tre palle; con quattro palle i tempi di apprendimento possono essere di settimane o mesi, e addirittura di anni con cinque palle, per la necessità di affinare continuamente il senso del tocco e del lancio.

Il record mondiale di oggetti messi in gioco (ciascuno lanciato e ripreso almeno una volta) è 12 anelli, 11 palle e otto clavette. Il numero è diverso a seconda del tipo di oggetto perché cambiano l'orientazione corretta, la difficoltà di presa e di lancio e il margine di errore per evitare collisioni.

Le ovvie restrizioni fisiche che limitano le possibilità di controllo e il numero di oggetti lanciati derivano dalla gravità, e più specificamente dalla meccanica newtoniana. Ciascuna palla deve essere lanciata abbastanza in alto da dare al giocoliere il tempo per manovrare le altre. Il tempo che una palla trascorre in aria è proporzionale alla radice quadrata dell'altezza del lancio. La velocità o l'altezza richieste crescono rapidamente con il numero di oggetti lanciati.

C'è poi l'imperfezione umana, che porta a errori sia di spazio sia di tempo. Lanciare basso lascia poche possibilità di evitare collisioni e richiede quindi

I giocolieri esperti, a differenza dei principianti, si affidano più al tatto che alla vista. Un professionista riesce perciò a eseguire anche bendato, per diversi minuti, esercizi comuni che vanno da un semplice scambio di palle (*nella pagina a fronte*) alla fontana a quattro palle (*non illustrata*) e alla cascata a tre palle (*qui sopra*).

Ken Regan/*Camera 5*; attrezzi forniti da Dubé Juggling Equipment

La più antica raffigurazione di giochi di destrezza, nella quale si vedono all'opera abili donne egiziane impegnate in diversi esercizi, si trova nella tomba 15 di Beni Hassan, appartenente a un ignoto principe del Medio Regno, tra il 1994 e il 1781 a.C.

Ridisegnato da *Bildatlas zum Sport im Alten Ägypten*, di Wolfgang Decker

velocità nel lancio e nella presa, con la conseguente possibilità di errori. Lanciare alto dà più tempo per evitare o correggere gli errori, ma amplifica anche ogni possibile imperfezione. Per lanci di solo pochi metri, una deviazione di appena due o tre gradi alla partenza può produrre un errore di 30 centimetri o più nel punto di caduta.

Il teorema di Shannon sintetizza in modo elegante i vincoli temporali inerenti ai giochi di destrezza, definendo quale relazione debba esistere tra i tempi in cui le mani sono piene o vuote e il tempo che ciascuna palla trascorre in aria. In altri termini, aumentare il numero delle palle diminuisce la possibilità di variare la velocità dell'esercizio. Se si devono lanciare molte palle a una certa altezza, il teorema dice che anche la più piccola variazione nella velocità di lancio distrugge la figura.

Il modo in cui i giocolieri, all'interno di questi vincoli, riescono a coordinare gli arti ritmicamente e alla stessa frequenza è diventato un argomento di primaria importanza nello studio del movimento umano. I ricercatori impegnati in questo settore hanno mutuato alcuni concetti dalla teoria matematica degli oscillatori accoppiati.

Il fenomeno chiave nell'oscillazione accoppiata è la sincronizzazione: la tendenza di due arti a muoversi alla stessa frequenza. Il particolare tipo di coordinazione mostrato dalle mani che eseguono un gioco di destrezza dipende dal tipo di esercizio. Nella cascata, per esempio, l'incrociarsi delle palle da una mano all'altra richiede che una mano afferri allo stesso ritmo con cui l'altra lancia. Le mani si danno anche il turno: l'una prende una palla dopo che l'altra ne ha lanciata una.

La figura a fontana, invece, può essere eseguita in due modi: lanciando (e riprendendo) le palle simultaneamente con entrambe le mani (in modo sincrono) o lanciando una palla con una mano e prendendone una con l'altra mano (in modo asincrono). In linea teorica, si può eseguire la fontana con frequenze diverse per le due mani, ma in questo caso la coordinazione è resa difficile dalla tendenza degli arti a muoversi in sincronia.

La definizione dei vincoli fisici e temporali è solo un aspetto dell'analisi dei giochi di destrezza. Perché sia realistico, il modello deve includere almeno altri tre fattori che tendono a complicarlo. Innanzitutto l'oscillazione della mano non è uniforme, in quanto contiene una palla durante una parte della traiettoria ed è vuota nella parte restante. In secondo luogo, i movimenti delle mani sono influenzati dalla necessità di precisione nel lancio e nella presa. Infine la sincronizzazione tra le mani si fonda su una combinazione di vista, tatto e memoria.

Questi fattori rendono gli schemi degli esercizi di destrezza intrinsecamente variabili: per quanto uniforme sia l'esecuzione, due lanci e due prese non sono mai uguali. L'analisi di questa variabilità aiuta a capire la strategia seguita dai giocolieri per produrre uno schema uniforme che riduca al minimo gli errori.

Le variabili associate al lancio (angolo di uscita, velocità di uscita, localizzazione e altezza dei lanci) sono le più controllabili: i giocolieri cercano di lanciare le palle nel modo più uniforme possibile, secondo una distribuzione temporale che deve obbedire al teorema di Shannon.

PROSPETTIVA DELLA MANO

PRIMA PALLA — SECONDA PALLA — TERZA PALLA

LA MANO TIENE UNA PALLA

LA MANO È VUOTA

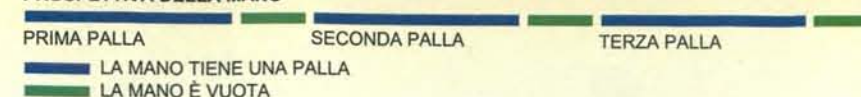
PROSPETTIVA DELLA PALLA

MANO DESTRA — MANO SINISTRA

PALLA IN UNA MANO

PALLA IN VOLO

TEMPO

Carey Ballard

Il teorema dei giochi di destrezza proposto da Claude E. Shannon del Massachusetts Institute of Technology è qui rappresentato schematicamente per la cascata a tre palle. L'equazione esatta è $(F + D)H = (V + D)N$, dove F è il tempo che una palla trascorre nell'aria, D è il tempo in cui una palla rimane nella mano, V è il tempo in cui una mano è vuota, N è il numero delle palle e H il numero delle mani che si impegnano nell'esercizio. Per dimostrare il teorema si segue un ciclo completo dell'esercizio dal punto di vista della mano e dal punto di vista della palla e poi li si eguaglia.

Data una certa altezza del lancio, una misura cruciale della velocità di esecuzione è il cosiddetto «rapporto di pausa», ossia la frazione di tempo durante la quale la mano trattiene una palla tra due prese (o due lanci). In generale, se il rapporto di pausa è grande, la probabilità di collisioni in aria è bassa, perché la mano, trattenendo la palla per un tempo relativamente lungo, ha l'opportunità di lanciare in modo preciso. Se il rapporto di pausa è piccolo, il numero di palle che si

La matematica dei giochi di destrezza

Un metodo a cui si affidano molti giocolieri per indicare i diversi esercizi è la notazione a «scambio di posizione», elaborata indipendentemente intorno al 1985 da Paul Klimek dell'Università della California a Santa Cruz, Bruce Tiemann del California Institute of Technology e Michael Day dell'Università di Cambridge. Si tratta di una notazione compatta che rappresenta l'ordine in cui gli attrezzi sono lanciati e ripresi in ciascun ciclo dell'esercizio, presupponendo che i lanci avvengano secondo un ritmo costante nel tempo.

Per capire come funziona, prendiamo in considerazione la classica cascata a tre palle. La prima palla è lanciata negli istanti 0, 3, 6..., la seconda in quelli 1, 4, 7... e la terza in quelli 2, 5, 8... La notazione a scambio di posizione usa il tempo che intercorre tra i lanci per descrivere la figura. In questo caso l'intervallo tra i lanci è di tre battute, quindi il suo scambio di posizione è 33333..., o in breve 3. La notazione per la doccia a tre palle (prima palla 0, 5, 6, 11, 12..., seconda palla 1, 2, 7, 8, 13..., terza palla 3, 4, 9, 10, 15...) è data da due cifre, 51, dove il 5 si riferisce alla durata del lancio alto e l'1 al tempo necessario per passare la palla da una mano all'altra nella parte inferiore dell'arco. Altri scambi di posizione con tre palle sono 441, 45141, 531 e 504 (uno 0 rappresenta una sosta, quando non si verifica alcun lancio o presa).

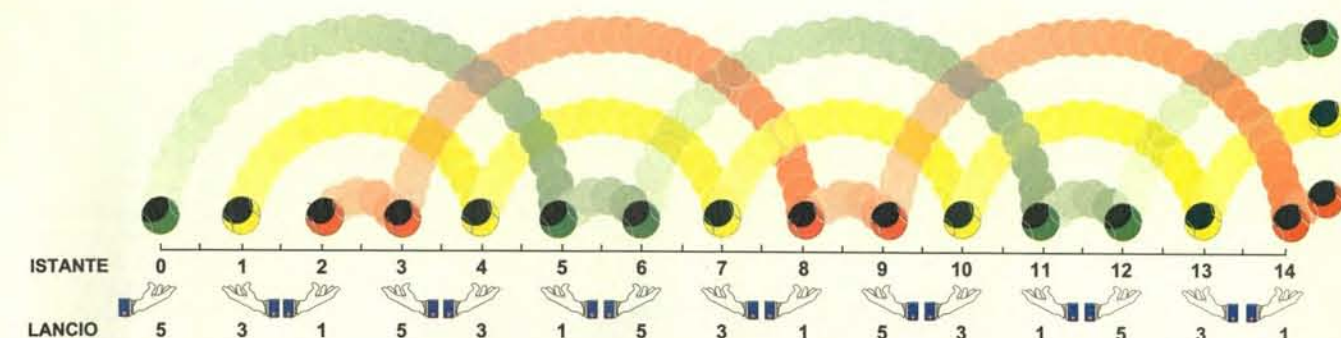
Il modo più semplice di tradurre uno scambio di posizione in modo da scoprire come vengono effettivamente lanciate le palle è disegnare un diagramma di semicerchi su un asse del tempo numerato. I punti dell'asse con numeri pari corrispondono a lanci effettuati con la mano destra, quelli con numeri dispari a lanci eseguiti con la mano sinistra.

Consideriamo, per esempio, la figura 531. Scriviamo i numeri 5, 3 e 1 alcune volte in fila, ciascuna cifra sotto punti successivi dell'asse numerato partendo dal punto 0 (*si veda l'illustrazione a destra in alto*). La cifra sotto il punto 0 è 5: quindi, partendo da lì, tracciamo un semicerchio di diametro pari a cinque unità fino al punto 5; esso rappresenta un lancio abbastanza alto da trascorrere cinque unità di tempo (battute) in aria. La cifra sotto il punto 5 è 1; quindi tracciamo un semicerchio di diametro 1 dal punto 5 al punto 6. Il punto 6 ha sotto di sé un 5, perciò il semicerchio successivo va dal punto 6 al punto 11. Abbiamo tracciato in questo modo il percorso nel tempo della prima palla, che risulta uguale a quello della prima palla nella figura della doccia a tre palle 51 descritta in precedenza. Ripetiamo il procedimento a partire dagli istanti 1 e 2, rispettivamente, per tracciare il percorso delle altre due palle. Il risultato è che sia la prima sia la terza palla si muovono secondo una figura a doccia, ma in direzioni opposte, mentre la seconda palla segue la traiettoria della figura a cascata tra le altre due. Se si elimina questa palla centrale, il risultato non è altro che il semplice scambio di posizione a due palle 501.

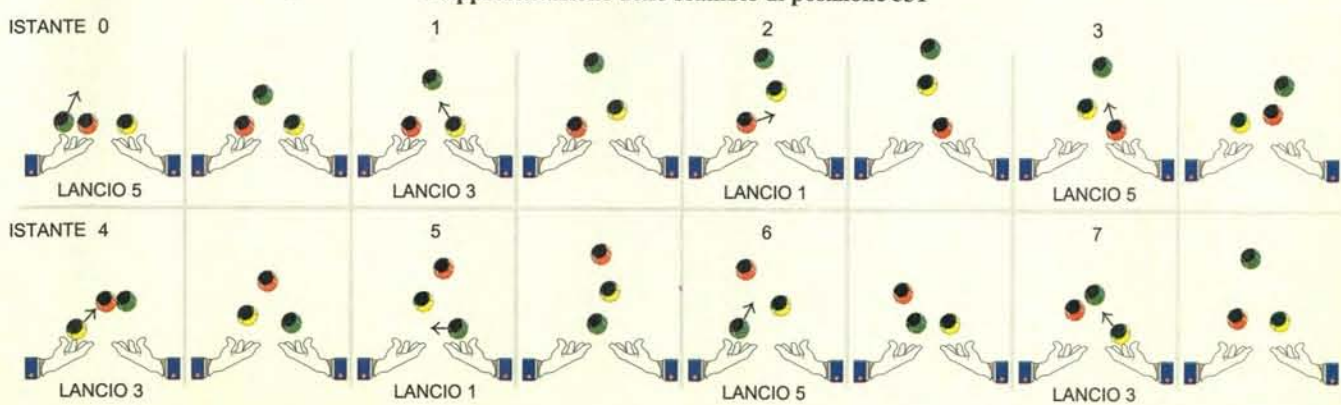
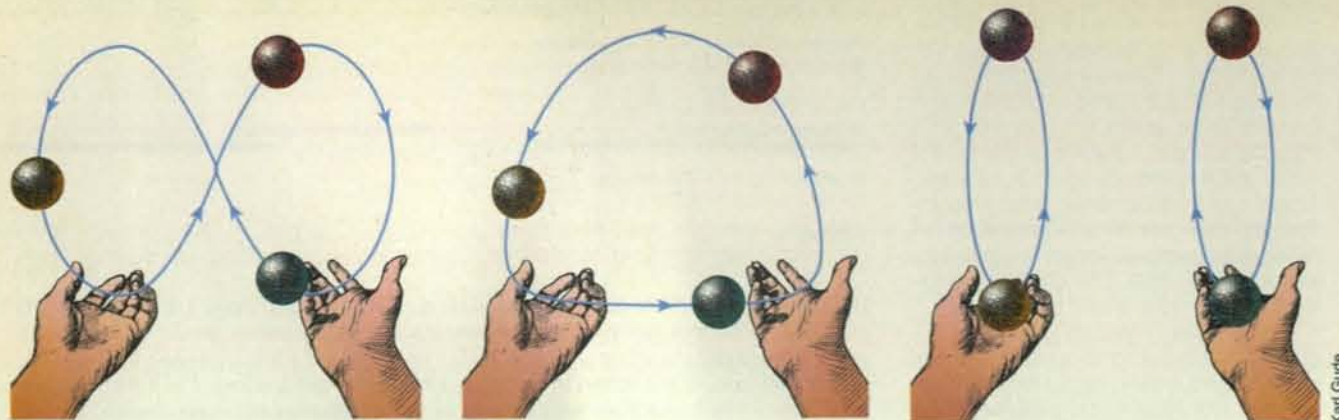
Non tutte le successioni numeriche possono essere tradotte in esercizi accettabili di giochi di destrezza: per esempio, la successione 21 porta entrambe le palle a cadere contemporaneamente nella stessa mano (anche se varianti più complesse della notazione a scambio di posizione consentono che più di una palla possa essere presa o lanciata allo stesso tempo).

La notazione a scambio di posizione ha condotto all'invenzione di alcuni esercizi che stanno diventando popolari per la bellezza della loro esecuzione, come il 441, o perché aiutano a padroneggiare altri esercizi, come la figura a quattro palle 5551 che serve da introduzione per imparare la cascata a cinque palle. Esistono numerosi programmi per calcolatore in grado di produrre animazioni di qualsiasi scambio di posizione e di identificare quelli ammissibili. Questi programmi consentono ai giocolieri di vedere come appaia un esercizio prima di provare a realizzarlo o semplicemente di osservare esercizi umanamente impossibili.

Le stringhe di numeri che danno luogo a figure ammissibili hanno inattese proprietà matematiche. Per esempio, il numero di palle necessarie per un certo esercizio è uguale alla media numerica delle cifre appartenenti alla stringa dello scambio di posizione che lo descrive. Così, la figura 45141 richiede (4 + 5 + 1 + 4 + 1)/5, ossia tre palle. Il numero di scambi di posizione ammissibili lunghi n cifre che utilizzano b (o meno) palle corrisponde esattamente a b elevato a n. A dispetto della sua semplicità, questa formula è risultata sorprendentemente difficile da dimostrare.

La teoria dello scambio di posizione è lungi dal consentire una descrizione completa di tutti i possibili esercizi di destrezza, in quanto riguarda solo l'ordine con cui le palle sono lanciate e riprese e ignora tutti gli altri aspetti, quali la localizzazione e lo stile dei lanci e delle prese. Molti degli esercizi di destrezza più popolari, come lanciare le palle da sotto una gamba o da dietro la schiena, vengono eseguiti come parte di una normale cascata e quindi la loro notazione a scambio di posizione rimane la stessa.

Rappresentazione dello scambio di posizione 531

Il 531 in azione

Johnny Johnson

Comuni esercizi di destrezza

CASCATA A TRE PALLE — DOCCIA A TRE PALLE — FONTANA A QUATTRO PALLE («IN SINCRONIA»)

Karl Gude

trovano in aria, mediato nel tempo, è grande, e questo favorisce le correzioni perché le mani hanno più tempo per cambiare posizione.

I principianti tendono a scegliere grandi rapporti di pausa per migliorare la precisione dei lanci, mentre i più esperti preferiscono valori più piccoli, soprattutto negli esercizi con tre palle, per passare da una figura all'altra con maggiore flessibilità. Misurazioni effettuate da uno di noi (Beek) dimostrano che il rapporto di pausa nell'esercizio a cascata può variare grosso modo da 0,5 a 0,8, e che i rapporti più ricorrenti sono prossimi a 3/4, 2/3 e 5/8. In una cascata a tre palle, cioè, le palle arrivano a trascorrere in aria il doppio del tempo che passano nelle mani. Questo intervallo di valori indica che i giocolieri cercano un equilibrio tra le due esigenze conflittuali di stabilità e flessibilità, apportando correzioni in risposta a perturbazioni esterne e a errori. Inoltre la tendenza verso rapporti di pausa rappresentati da frazioni semplici illustra sottilmente la tendenza umana a cercare soluzioni ritmiche a esercizi fisici.

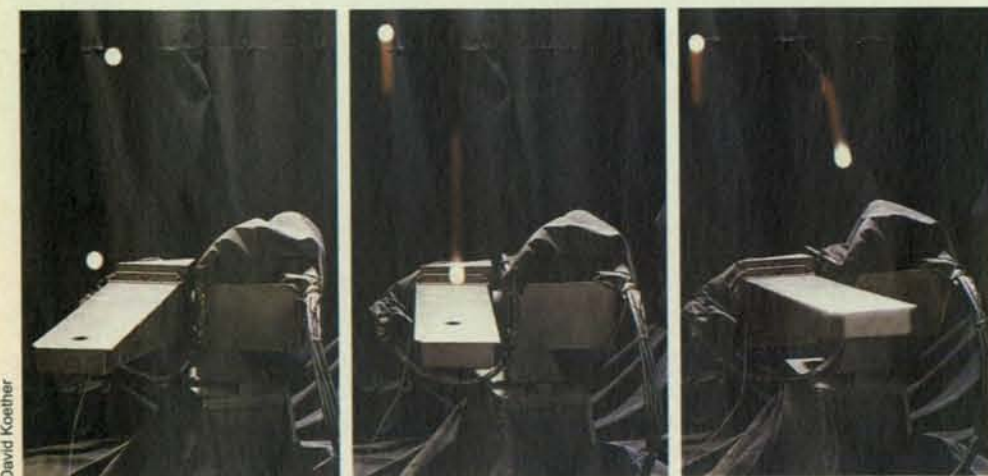
I giochi con più di tre palle riducono la possibilità di variare il rapporto di pausa, perché le palle devono essere lanciate più in alto e quindi con maggiore precisione, il che impone notevoli limiti agli esercizi. Lanciare e riprendere tre oggetti lascia ampie opportunità di modificazioni, adattamenti, trovate e abbellimenti; invece non ci sono molti modi per eseguire un esercizio con nove oggetti.

Costruire modelli di questi schemi di movimento, però, dice poco sulla necessaria coordinazione mano-occhio. I giocolieri devono ricevere informazioni sui movimenti sia delle mani sia delle palle. Non sono molti i contesti in cui il tipico consiglio dell'allenatore «Guarda la palla» è poco indicato come nei giochi di destrezza. L'attenzione deve passare da una palla alla successiva, e quindi il giocoliere vede solo una parte della traiettoria di ciascuna palla.

Quale parte della traiettoria trasmette più informazioni e richiede maggiore attenzione visiva? «Guarda il punto più alto» e «Lancia la palla successiva quando la precedente raggiunge il culmine» sono le istruzioni che ricorrono più spesso nell'addestramento. Nel 1974, quando era specializzando al MIT, Howard A. Austin studiò quanto debba essere ampia la regione intorno al culmine della traiettoria che un giocoliere di media abilità ha bisogno di vedere per riuscire a portare a termine un esercizio. Egli collocò tra le mani e gli occhi del giocoliere uno schermo con una «finestrella» a cuneo e vide che si poteva riuscire in una presa anche quando rimanevano visibili solo due centimetri e mezzo della traiettoria in corrispondenza del punto più alto raggiunto dalla palla. Dato che questo corrisponde a un tempo di visione di circa 50 millisecondi, ne segue che è sufficiente una rapida occhiata al culmine della traiettoria per la riuscita dell'esercizio.

Nel 1994 Tony A. M. van Santvoord della Libera Università di Amsterdam esaminò più in dettaglio la correlazione tra movimenti della mano e visione della palla. Fece indossare a giocolieri che eseguivano una cascata a tre palle occhiali a cristalli liquidi che si aprivano e si chiudevano a intervalli prestabiliti, permettendo solo una visione intermittente delle palle. Dalla relazione tra il movimento delle palle in aria e il ritmo definito dagli occhiali si potevano dedurre la posizione delle palle quando gli occhiali erano aperti, la scelta del segmento di traiettoria osservato e il grado di coordinazione tra i movimenti della mano e l'informazione visiva.

Talvolta i soggetti modificavano l'esercizio per adattarsi alla frequenza di apertura e chiusura degli occhiali; in quel caso facevano in modo che le palle diventassero visibili subito dopo aver rag-

David Koether

Questo braccio robotico può ribattere indefinitamente due palle in una figura a fontana. Una cinepresa registra la traiettoria delle palle e un particolare algoritmo, che può correggere gli errori e cambiare la cadenza dell'esercizio, controlla il movimento del robot. La macchina qui rappresentata è stata costruita da Daniel E. Koditschek e Alfred A. Rizzi dell'Università del Michigan.

giunto il culmine della traiettoria. Risulta inoltre che l'allenamento renda sempre meno importante la visione delle palle. In generale, i giocolieri principianti e di media abilità si affidano alla vista, mentre quelli esperti si basano più sulle sensazioni che provengono dal contatto tra le mani e le palle. Già nel 1890 William James, nel suo *The Principles of Psychology*, osservava che il giocoliere Jean-Eugène Robert-Houdin era in grado di lanciare e riprendere quattro palle leggendo un libro. Molti abili giocolieri riescono a eseguire per parecchi minuti giochi di destrezza con gli occhi bendati.

Un'ipotesi plausibile è che, allenandosi, si riesca a passare poco per volta dall'osservazione della palla a una calibrazione fine del tatto. Un esperto rileva immediatamente una leggera imperfezione nell'angolo di lancio desiderato o nell'energia impressa alla palla, mentre un principiante deve vedere l'effetto degli errori nella traiettoria. Quindi un esperto riesce spesso ad apportare correzioni senza turbare l'integrità dell'esercizio, mentre i rimedi tentati da meno abili compromettono spesso la fluidità complessiva dell'esecuzione.

Gli studi sui giochi di destrezza hanno portato a tentare di riprodurli con robot che dovrebbero servire come punto di partenza per automi più sofisticati. Molti aspetti dei giochi di destrezza hanno implicazioni anche per compiti della vita di tutti i giorni che richiedono di prevedere con precisione eventi che stanno per accadere e di organizzare le azioni che si stanno compiendo.

Pioniere di questo settore della robotica è Shannon, che costruì negli anni settanta una macchina che eseguiva giochi di destrezza facendo rimbalzare palline d'acciaio su una pelle di tamburo molto tesa. Gli esercizi che si basano sul rimbalzo sono più facili da eseguire di quelli che comportano un lancio perché le palle vengono afferrate al vertice della traiettoria, quando la loro velocità è minima.

Nella macchina di Shannon i bracci sono fissi l'uno rispetto all'altro. Il movimento dell'unità è una semplice oscillazione, e ciascun braccio effettua una presa quando oscilla verso il basso e un lancio quando oscilla verso l'alto. Per correggere gli errori di lancio la macchina ha corti binari incavati che sostituiscono le mani. Le palle, afferrate vicino al culmine della traiettoria, finiscono nel binario; il movimento del braccio verso il basso fa rotolare la palla in fondo al binario impartendole energia sufficiente per il lancio. La macchina originale di Shannon eseguiva esercizi con tre palle; seguendo gli stessi principi, Christopher G. Atkeson e Stefan K. Schaal del Georgia Institute of Technology ne hanno in seguito costruita una che riesce a controllare cinque palle.

I robot che eseguono giochi di rimbalzo con tre palle sono già diabolicamente «abili», ma un robot che esegua esercizi di lancio come la cascata a tre palle e sia in grado di correggere gli errori deve ancora essere costruito. Qualche progresso, però, è stato fatto. Vi sono macchine capaci di afferrare e ribattere palle nell'aria, nonché robot che eseguono esercizi di destrezza in due dimensioni. Negli anni ottanta Marc D. Donner del Thomas J. Watson Research Center della IBM usò a questo scopo un piano inclinato senza attrito dotato di due meccanismi di lancio che si muovevano su binari lungo lo spigolo inferiore del tavolo.

Ken Regan/Camera 5

Il giocoliere Tony Duncan, le cui mani appaiono nelle fotografie d'apertura, sa eseguire esercizi anche con le clavette.

Nel 1989 Martin Bühler della Yale University e Daniel E. Koditschek, attualmente all'Università del Michigan, compirono un ulteriore passo avanti. Invece di un dispositivo di lancio su binario, utilizzarono una singola barra rotante ricoperta di feltro per ribattere in alto sul piano dei dischi da hockey. Per controllare la barra in modo da farle eseguire esercizi di destrezza periodici, i ricercatori si affidarono al cosiddetto algoritmo specchio.

Quest'ultimo combina sostanzialmente due concetti. Il primo è tradurre (o «rispecchiare») la traiettoria continua del disco in una traiettoria di riferimento *on-line* per controllare il movimento del robot (attraverso una funzione non lineare accuratamente scelta). Il vantaggio dell'algoritmo specchio è che non richiede una conoscenza perfetta dello stato del disco al momento dell'impatto, informazione che nella realtà è difficile da ottenere. Il secondo concetto è quello di stabilizzare il movimento verso l'alto del disco analizzandone l'energia per confrontarla con l'energia ideale prodotta da un lancio perfetto. Così, il programma registra la posizione del disco, calcola la traiettoria specchio di riferimento nonché l'energia effettiva e quella voluta del disco e stabilisce quando e con che forza questo vada colpito. Con una versione perfezionata dell'algoritmo specchio, il robot riesce anche a eseguire un tipo di gioco di destrezza bidimensionale a una mano con due dischi: ribatte infatti verso l'alto i dischi, in due colonne separate, colpendoli in alternanza con la parte sinistra e quella destra della barra rotante.

Vedere l'algoritmo specchio in azione è uno spettacolo. Se si perturba la traiettoria di un disco, il braccio robotico compie alcuni movimenti a scatti che appaiono del tutto innaturali a un giocoliere umano, ma che gli permettono di tornare quasi per magia a un'esecuzione calma e scorrevole. Questo algoritmo controlla abilmente il movimento di battuta, ma non ha molto successo nel problema ben più difficile di eseguire esercizi con prese controllate.

Oltre a far rimbalzare e battere vari oggetti, i robot riescono a eseguire tutta una serie di altre attività connesse ai giochi di destrezza, come spingere bastoncini avanti e indietro, far saltellare, bilanciare, lanciare e riprendere palle in una mano a forma di imbuto e giocare una variante modificata di Ping-Pong. Nonostante questi progressi, nessun robot è in grado di eseguire giochi di destrezza in un modo che sembri anche vagamente umano. Ma si tratta di un campo di studi relativamente nuovo e la velocità di miglioramento negli ultimi due decenni è stata notevole.

PETER J. BEEK e ARTHUR LEWBEL sono ricercatore presso la Facoltà di movimento umano della Libera Università di Amsterdam e professore di economia alla Brandeis University. Entrambi sono giocolieri e sanno eseguire esercizi con tre e otto palle rispettivamente.

Si ringrazia per la consulenza Luca de Riu di Look Up, via Osoppo 12, 20148 Milano (02 40074304), importatore di materiale per giochi di destrezza.

BEEK PETER J. e TURVEY MICHAEL T., *Temporal Patterning in Cascade Juggling* in «Journal of Experimental Psychology», 18, n. 4, novembre 1992.

Scientific Aspects of Juggling in *Claude Elwood Shannon: Collected Papers*, a cura di N. J. A. Sloane e A. D. Wyner, IEEE Press, 1993.

BUHLER J., EISENBUD D., GRAHAM R. e WRIGHT C., *Juggling Drops and Descents* in «American Mathematical Monthly», 101, n. 6, giugno-luglio 1994.

VAN SANTVOORD TONY e BEEK P. J., *Phasing and the Pickup of Optical Information in Cascade Juggling* in «Ecological Psychology», 6, n. 4, autunno 1994.

STEWART IAN, *Juggling by Numbers* in «New Scientist», n. 1969, 18 marzo 1995.

L'ANGOLO MATEMATICO

di Ian Stewart

La partita a scacchi infinita

Chiunque giochi a scacchi sa che certe partite finiscono in un vicolo cieco: nessuno dei giocatori sembra in grado di vincere, non ci sono mosse risolutive e pare che non esista alcun modo per concludere il gioco. Se i due giocatori non accettano la patta, la partita potrebbe proseguire a tempo indefinito. Prevedendo situazioni del genere, gli organismi che formulano i regolamenti degli scacchi hanno proposto diverse norme per garantire la fine di una partita. La regola classica stabilisce che una partita è pari se un giocatore dimostra che sono state fatte 50 mosse a testa senza che si sia dato scacco matto, che alcun pezzo sia stato catturato e che sia stato mosso alcun pedone.

Recenti analisi al calcolatore, però, hanno dimostrato che la regola non è sufficiente. Ci sono alcuni finali di partita nei quali un giocatore può arrivare alla vittoria in più di 50 mosse, senza che alcun pezzo sia stato catturato e si sia mosso alcun pedone. I regolamenti degli scacchi, quindi, devono tener conto di simili situazioni eccezionali. Qualsiasi norma che limiti il numero di mosse consentite sotto particolari condizioni corre lo stesso rischio della regola originale; sarebbe opportuno, allora, scegliere un approccio completamente diverso.

Un'alternativa che è stata proposta qualche tempo fa è che una partita deve avere termine nel caso in cui la medesima successione di mosse, con i pezzi in posizioni esattamente identiche, si ripeta per tre volte di seguito. (Questa proposta non va confusa con la regola tradizionale secondo cui, se la stessa posizione si ripete per tre volte, il giocatore che si trova davanti a questa situazione può richiedere che la partita sia considerata pari, ma non è obbligato a farlo.) Si può fondatamente ritenere che una violazione di questa regola delle tre posizioni identiche in fila dovrebbe far terminare la partita. La questione è se esistano partite senza sbocco apparente che non la violino.

Una partita di scacchi può andare avanti per sempre senza che si arrivi allo scacco matto e senza che si ripeta la stessa successione di mosse per tre volte di seguito? Dato che gli scacchi sono un gioco piuttosto complesso, un matematico cercherebbe di semplificare il problema. Supponiamo di concentrare l'attenzione su due possibili mosse, rappresentate da 0 e 1. Una successione di 0 e 1 può proseguire all'infinito senza che un blocco - una sua parte finita - si ripeta per tre volte di seguito?

La risposta è affermativa: ci sono parecchi modi per produrre una successione di quel genere, che chiamerò successione senza triplette. Marston Morse e Gustav A. Hedlund sono stati i primi a ottenere una successione senza triplette nel corso di una ricerca su un problema di dinamica. Iniziamo con un singolo 0 e facciamolo seguire dalla successione complementare (nella quale ogni 0 viene trasformato in un 1 e viceversa), che in questo caso è data semplicemente da 1; otteniamo così 01. Facciamo poi seguire a 01 la sua successione complementare, 10, e così via, fino a costruire una successione infinita del tipo

0
01
0110
01101001... e così via.

Johnny Johnson

In questa partita di scacchi infinita i cavalli continuano a muoversi avanti e indietro tra due caselle. I simboli 0 e 1 mostrano i termini corrispondenti nella «successione corale» senza triplette.

Questa successione è effettivamente senza triplette, ma dimostrarlo è molto complesso. Consideriamo allora un'altra successione senza triplette per la quale la dimostrazione è un po' più semplice. Per descriverla ci serve qualche definizione di termini. Ricordiamo che ogni numero pari è un multiplo di 2, ossia è della forma $2m$ per un certo m, e un numero dispari è pari a un multiplo di 2 più 1, ossia è uguale a $2m+1$. Ci serve una descrizione analoga per i multipli di tre. Chiamiamo «tenore» un numero se è un multiplo di 3, ossia uguale a $3m$; «soprano» se supera di uno un multiplo di 3, ossia è uguale a $3m+1$; e «basso» se è inferiore di uno a un multiplo di 3, ovvero è uguale a $3m-1$. Un numero intero è tenore, soprano o basso. Se un numero è soprano, chiamiamo m il suo predecessore. Per esempio, $16=(3\times 5)+1$ è soprano, e il suo predecessore è 5, che è basso.

Con questa terminologia possiamo scrivere un insieme di regole che producono una successione in cui un blocco non si ripete mai tre volte di fila:

Regola 1: Il primo termine è 0.
Regola 2: Il termine n-esimo della successione è 0 se n è tenore.
Regola 3: Il termine n-esimo della successione è 1 se n è basso.
Regola 4: Se n è soprano e il suo predecessore è m, il termine n-esimo della successione è uguale al termine m-esimo.

Le prime tre regole ci dicono che la successione ha la forma 010*10*10*10*10..., dove il gruppo *10 si ripete all'infinito e gli elementi rappresentati dall'asterisco, non ancora determinati, vengono definiti dalla quarta regola. L'elemento 4, per esempio, è uguale al suo predecessore, che è uguale al primo elemento, cioè 0. L'elemento 7 è uguale al suo predecessore, che è uguale al secondo elemento, ossia 1, e così via. Dato che i predecessori sono più piccoli dei corrispondenti soprani, si trova prima il loro valore, e quindi la regola 4 stabilisce effettivamente a che cosa corrispondano tutti gli asterischi.

Queste regole portano a quella che io chiamo successione corale: 010 010 110 010 010 110 010 110 110 010 010 110. Ho raggruppato i termini a tre a tre, evidenziando in neretto il soprano per mettere meglio in luce la struttura. La successione corale ha la curiosa proprietà che i termini soprano riproducono esattamente l'intera successione. Ci sono parecchie ripetizioni doppie in questa successione - i primi 18 termini, per esempio, ripetono due volte la successione 010010110 - ma nessun blocco si ripete mai tre volte (*si veda la dimostrazione nella finestra qui sopra*).

In che modo quello che si è detto può servire a risolvere il problema della partita a scacchi infinita? Negli scacchi, dopo tutto, non ci sono certo solo due mosse, e se ne scegliamo due (per esempio, avanzare il pedone di re e muovere di tre caselle in avanti la torre di re), non è affatto detto che la successione corrisponda a mosse consentite. Il modo per superare l'obiezione è in realtà molto semplice, ma forse volete pensarci da soli prima di procedere nella lettura.

Va bene, andiamo avanti. Poniamo che entrambi i giocatori si limitino a muovere avanti e indietro uno dei loro cavalli (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*). A seconda della loro posizione, ciascuno dei cavalli può andare avanti o indietro. Supponiamo che i giocatori usino la successione di 0 e 1 per determinare le loro mosse in modo che uno 0 rappresenti «muovere il cavallo di re» (RC) e un 1 significhi «muovere il cavallo di regina» (DC), in questo modo:

0 il Bianco muove RC (avanti)
1 il Nero muove DC (avanti)
0 il Bianco muove RC (indietro)
0 il Nero muove RC (avanti)
1 il Bianco muove DC (avanti)
0 il Nero muove RC (indietro)

Non si può dire che sia una partita eccitante, ma ciascuna singola mossa è consentita. E a causa della sua relazione con la successione corale, questa partita prosegue chiaramente all'infinito senza ripetere la stessa successione di mosse per tre volte di seguito. In effetti, in senso più stretto, non ripete la stessa successione di pezzi (RC o DC) tre volte di fila. Quindi, se si sta cercando una regola veramente inattaccabile per terminare le partite senza sbocco - una regola che valga anche contro giocatori che si accordino per giocare in modo stupido - la vecchia proposta dei tre in fila non funziona.

Questo particolare problema spinge i matematici a interrogarsi su questioni analoghe relative alle successioni di simboli. Esiste una successione di 0 e 1 in cui un blocco non si ripeta mai due volte di seguito? La risposta cambia se sono ammessi più simboli, per esempio 0, 1 e 2? Anche se non modificheranno i regolamenti degli scacchi o non produrranno giocatori più bravi, gli appassionati di giochi matematici dovrebbero divertirsi a trasformare quesiti di questo genere in problemi analoghi relativi agli scacchi.

Dimostrazione del fatto che nessun blocco si ripete tre volte

Chiamiamo i simboli 0 e 1 termini della successione corale e diciamo che il termine n-esimo è tenore, basso o soprano se anche n lo è. Ci sono cinque casi da prendere in considerazione:

Primo, nessuna singola cifra si ripete tre volte di fila, perché tre termini consecutivi qualsiasi devono includere sia un tenore sia un basso, che sono diversi per definizione.

Secondo, nessun blocco di due cifre si ripete tre volte di seguito, perché sei termini consecutivi qualsiasi contengono un blocco della forma 0*1. Né 010101 né 101010 - le uniche ripetizioni possibili - compaiono nella successione corale.

Terzo, se un blocco di tre cifre si ripetesse per tre volte, dovrebbe contenere tre termini soprano i cui predecessori siano tutti uguali e consecutivi, e questo è escluso dal primo caso.

Quarto, se un blocco di lunghezza pari a un multiplo di tre - per esempio $3k$ - si ripete tre volte, un ragionamento analogo dimostra che deve esserci stata, in qualche punto precedente della successione, la ripetizione di un blocco di lunghezza k.

L'unico caso che rimane è quello della ripetizione per tre volte di un blocco che abbia almeno quattro cifre e che non sia un multiplo di 3. Qui la prova diventa più complessa. Per farsene un'idea, supponiamo che la lunghezza sia di quattro cifre, in modo che la successione includa un blocco della forma *abcdabcdabcd*. Uno dei primi tre termini deve essere tenore; supponiamo, per esempio, che lo sia *c*. Allora la successione è *ab*0*dab*0*dab*0*d*.

Ma anche ogni terzo termine dopo il primo 0 - segnalato in neretto - è tenore, quindi $b=a=d=0$. L'intero blocco è allora 000000000, e questo è escluso dal primo caso. Un ragionamento analogo si può fare nel caso che sia tenore *a*, *b* o *d*. Una versione più complessa dello stesso tipo di argomentazione vale per qualsiasi blocco di lunghezza diversa da un multiplo di 3.